Agricultural Economics and Development

Vol. 33, No. 130, Summer 2025

Research Paper

The Role of Human Development, Fossil and Renewable Energy Consumption, and Climate Change in Iran's Food Security

A. Sargazi [1], *H. Parsa Monfared* [2]

Received: 12 November, 2024 Accepted: 12 May, 2025

Introduction: Ensuring food security— both in terms of quantity and quality— remains a strategic priority for most nations, particularly developing countries facing multifaceted environmental and socio-economic challenges. Iran, characterized by its growing population, urbanization, limited water resources, and vulnerability to climate change, is no exception. These issues, coupled with sanctions and resource mismanagement, have intensified the urgency for policy interventions to sustain and enhance food production systems. This study aimed at investigating the intricate and nonlinear relationship between food security and several influential factors including Human Development Index (HDI), energy consumption from renewable and non-renewable sources, carbon dioxide emissions (as a proxy for climate change), and labor force participation in the agricultural sector. Understanding the asymmetrical impact of these factors over time is essential for formulating robust policies that ensure sustainable food access and resilience against future shocks.

Materials and Methods: This research used annual time-series data from 1990 to 2022 to analyze the dynamic relationships between food security and its potential determinants in Iran. The dependent variable was Food Production Index (FPI), which serves as a proxy for food security. The independent variables included: HDI (Human Development Index), reflecting education, health, and income dimensions; LENE (Log of Non-Renewable Energy Consumption), measured by energy used in the agricultural sector; RNE (Renewable Energy Consumption), expressed as a percentage of total energy consumption; LCO2

1. Corresponding Author and Assistant Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran (a.sargzi66@gmail.com).
2. MSc.Student in Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.

DOI: 10.30490/aead.2025.367320.1642

(Log of CO_2 Emissions), as a measure of environmental degradation and climate change; and LLAB (Log of Labor in Agriculture), representing workforce capacity in food production. All data were obtained from credible sources such as the World Bank, UNDP, FAO, and OECD. The variables were logarithmically transformed for normalization and to allow for elasticity interpretation. Nonlinear Autoregressive Distributed Lag (NARDL) model was employed as the econometric methodology. This approach enables the differentiation between the effects of positive and negative shocks (asymmetries) in the explanatory variables on food security, both in the short and long runs. Unit root tests (ADF and PP), BDS nonlinearity tests, bounds testing for cointegration, and diagnostic checks (CUSUM, CUSUMSQ) were applied to ensure the robustness and stability of the model.

Results and Discussion: The estimation results highlighted the asymmetric effects of various socio-economic and environmental factors on the food security in Iran. A positive shock in HDI would improve the food security by 3.09 percent, underscoring the importance of education and healthcare in enhancing agricultural productivity. Conversely, a negative HDI shock would cause a sharp 17.06 percent decline, revealing significant vulnerability to social setbacks. In addition, negative shocks in non-renewable energy consumption (LENE) would reduce the food security by 0.34 percent, emphasizing the role of energy access in agriculture, while positive shocks would be statistically insignificant due to potential environmental trade-offs. Similarly, the negative shocks in renewable energy consumption (RNE) would reduce the food security by 0.3 percent, pointing to the sector's dependency on stable renewable inputs, whereas the positive shocks would remain insignificant, reflecting the underdeveloped role of renewables in agriculture. Interestingly, both the positive and negative shocks in CO_2 emissions would slightly improve the food security (by 0.21 and 0.39 percent, respectively), possibly due to short-term fertilization effects, despite long-term ecological concerns. In terms of labor, the positive shocks would increase the food security by 0.89 percent, and the negative shocks would reduce it by 0.78 percent, reaffirming the labor-intensive nature of Iranian agriculture. Granger causality tests further confirmed a bidirectional relationship between CO_2 emissions and the food security, unidirectional causality from HDI, RNE, and LENE to the food security, and reverse causality from the food security to the labor. These results underlined the complex and asymmetric dynamics shaping the food security, influenced by socio-economic development, energy use, and environmental pressures.

Conclusion and Suggestions: The study concluded that improving human development indicators, expanding the share of renewable energy in agriculture, and maintaining a stable agricultural workforce were vital for enhancing the food security in Iran. The positive effects of CO_2 emissions, while notable in the short term, should not distract policymakers from the long-term risks of climate change. To mitigate vulnerabilities and build resilience, several policy recommendations are made as follows:

- Enhancing education, healthcare, and income equity to improve HDI;
- Reducing dependence on fossil fuels and investing in renewable energy technologies for agricultural use;
- Developing adaptive agricultural systems resilient to climate variability; and
- Supporting rural employment programs and reversing urban migration by improving rural livelihoods.

Given Iran's geopolitical challenges and environmental limitations, these strategies must be pursued through coordinated government planning and international cooperation.

Keywords: *Food Security, Econometrics, Clean Energies, Development, Climate Change.*

JEL Classification: Q18, Q56, O15, Q42, J43, C32

اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۳، شماره ۱۳۰، تابستان ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

بررسی نقش توسعه انسانی، مصرف انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر و تغییر اقلیم در امنیت غذایی ایران

علیرضا سرگزی[۱]، هستی پارسا منفرد[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

چکیده

حفظ امنیت غذایی از ابعاد کمی و کیفی از اهداف مهمی است که بسیاری از کشورها به‌دنبال تحقق آن هستند. در این مسیر، چالش‌هایی نظیر تغییرات اقلیم (آب‌وهوایی)، رشد جمعیت، شهرنشینی و کمیابی منابع وجود دارد که دستیابی بدین هدف را با مشکلاتی موجه می‌سازد. ایران به‌عنوان کشوری در حال توسعه نیز در مسیر حفظ امنیت غذایی، با چالش‌های متعدد مواجه است. بنابراین، شناسایی موانع تحقق امنیت غذایی و عوامل تقویت‌کننده آن بسیار ضروری است. مطالعه حاضر، با استفاده از داده‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ و با بهره‌گیری از رهیافت NARDL، به‌دنبال بررسی اثرات انرژی‌های تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر، شاخص توسعه انسانی، نیروی کار و تغییرات اقلیم شامل انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) بر امنیت غذایی شامل شاخص تولید غذا بود. نتایج پژوهش نشان داد که تکانهٔ (شوک) مثبت شاخص توسعهٔ انسانی اثری مستقیم و تکانهٔ منفی این شاخص اثری

۱- نویسندهٔ مسئول و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
(Alirezasargazi@uoz.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد کشاورزی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

DOI: 10.30490/aead.2025.367320.1642

معکوس بر امنیت غذایی دارد. همچنین، تکانهٔ منفی انرژی تجدیدناپذیر و انرژی تجدیدپذیر، به‌ترتیب، اثرات معکوس و مستقیم بر امنیت غذایی خواهد داشت، به‌گونه‌ای که با کاهش یک درصدی مصرف انرژی تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر، به‌ترتیب، امنیت غذایی به میزان ۰/۳۴ درصد افزایش و ۰/۳ درصد کاهش خواهد یافت. تکانه‌های مثبت و منفی انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) به‌عنوان جانشین (پراکسی) تغییرات اقلیم اثری مثبت بر امنیت غذایی نشان داده و با یک درصد افزایش انتشار این گاز، امنیت غذایی، به‌ترتیب، ۰/۲۱ و ۰/۳۹ درصد افزایش خواهد یافت. در نهایت، نیروی کار نیز به‌عنوان یکی از عوامل بهبود امنیت غذایی شناسایی شد، چراکه با کاهش یک درصدی این متغیر، امنیت غذایی ۰/۷۸ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج آزمون علیت نیز رابطه علّی دوطرفه میان تغییرات اقلیم و امنیت غذایی را تأیید کرد. به‌منظور تحقق اهداف ارتقای امنیت غذایی و کاهش آلودگی، برنامه‌ریزی در راستای کاهش مصرف کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی و افزایش مصرف کودهای آلی و پیگیری برنامه‌های مرتبط با کنترل آفات، افزایش تولید و مصرف انرژی‌های پاک و تولید محصولات اصلاح‌شدهٔ ژنتیکی کشاورزی با قابلیت مقاومت بالا در برابر آفات و تغییرات اقلیم، ضمن ارتقای کیفیت محیط زیست، به حفظ امنیت غذایی نیز کمک خواهد کرد.

کلیدواژه‌ها: *امنیت غذایی، اقتصادسنجی، انرژی‌های پاک، توسعه، تغییرات آب‌وهوایی.*

طبقه‌بندی JEL : Q18, Q56, O15, Q42, J43, C32

مقدمه

امنیت غذایی و تغذیه از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم است، به‌گونه‌ای که تغییرات آب‌وهوایی، عدم اطمینان اقتصادی و مالی و نیز افزایش رقابت برای منابع طبیعی از بزرگ‌ترین موانع پیش روی انسان‌ها برای چگونگی تغذیه جمعیت به‌شمار می‌رود که مطابق انتظار، تا سال ۲۰۵۰، جمعیت جهان به ۹/۵ میلیارد نفر خواهد رسید (FAO et al., 2020). در نواحی روستایی، تغییرات آب‌وهوایی مانند افزایش دما، نفوذ شوری، قحطی، طوفان، سیل و نیز تداوم و کاهش فصول بارندگی به کاهش تولیدات کشاورزی و دامی، افزایش مرگ‌و میر گله‌ها و در پی آن، تهدیدات جدی برای امنیت غذایی و تغذیه انجامیده است. برآوردها حاکی از آن است که از هر نُه نفر، یک نفر در سراسر جهان (حدود ۸۰۵ میلیون نفر) با کمبود مواد غذایی مواجه‌اند (Rahman et al., 2024; Bouteska et al., 2024). پیش‌بینی می‌شود که با تشدید بیشتر تغییرات آب‌وهوایی، تا دهه ۲۰۸۰، بهره‌وری کشاورزی به میزان ۱۵/۹ درصد در سطح جهان، ۱۹/۷ درصد در کشورهای در حال توسعه، و نیز به میزان خیره‌کنندهٔ حدود پانزده تا ۳۵ درصد در آفریقا کاهش یابد (Fischer et al., 2005; Pickson & Boateng, 2022).

کشاورزی از بخش‌های حساس و بسیار آسیب‌پذیر در برابر تغییرات آب‌وهوایی است که برای توسعه اقتصادی هر کشوری به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، نقش حیاتی دارد، چراکه نقش آن در اشتغال و امنیت غذایی چشمگیر است. همچنین، تغییرات اقلیمی بهره‌وری و الگوهای تولید کشاورزی را نیز

دستخوش تغییر کرده است (Arora, 2019). این تنوع در آب‌وهوا به یک مشکل جدی برای پایداری در کشورهایی تبدیل می‌شود که بخش کشاورزی آنها نقش حیاتی در حفظ معیشت و امنیت غذایی ایفا می‌کند (Kogo et al., 2021). تغییرات آب‌وهوایی، بیماری همه‌گیر جهانی (کووید ۱۹) و تشدید درگیری میان کشورها (به‌ویژه حمله روسیه به اوکراین) و درگیری‌های داخلی در بسیاری از کشورهای دیگر (مانند اتیوپی، میانمار، سودان و افغانستان) همگی در دسترسی کمتر بسیاری از مردم به غذا (کمبود دسترسی چه از نظر فیزیکی و چه از نظر اقتصادی) نقش داشته‌اند (Rosegrant et al., 2024). رویکردهای آینده‌نگری، چه از طریق فرآیندهای کیفی و چه از طریق مدل‌های کمی، به دانشمندان و تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد تا با استفاده از نتایج پیش‌بینی‌ها، طرح‌ریزی بهتری برای رفع مشکلات و مقابله با تهدیدها داشته باشند. در سال‌های اخیر، مدل‌ها و ابزارهای بررسی و پیش‌بینی پیشرفت کرده‌اند، به‌گونه‌ای که می‌توان از آنها در برآورد تغییرات آتی عرضه و تقاضای کشاورزی، امنیت غذایی و انتشار گازهای گلخانه‌های و ... کمک گرفت (Rosegrant et al., 2024).

از نظر مفهومی، امنیت غذایی به شرایطی گفته می‌شود که همه مردم در هر زمان، دسترسی فیزیکی و اقتصادی به غذای کافی، ایمن و مغذی داشته باشند، به‌گونه‌ای که نیازهای غذایی و ترجیحات غذایی آنها را برای یک زندگی فعال و سالم برآورده کند (Ferranti et al., 2019). درجه امنیت غذایی در یک کشور، در وهلهٔ اول، با تولید مواد غذایی تعیین می‌شود. دسترسی به غذای قابل اطمینان و مغذی برای یک جمعیت به‌طور مستقیم از حجم، کیفیت و قابلیت اطمینان تولید مواد غذایی تأثیر می‌پذیرد. تأمین مواد غذایی کافی و تولید مواد غذایی متنوع به افزایش امنیت غذایی کمک می‌کند. عوامل جهانی در تأثیرگذاری بر ظرفیت یک کشور برای تولید مواد غذایی بسیار اهمیت دارند (Rehman et al., 2024).

تحقق انرژی پایدار برای دستیابی به امنیت غذایی در بلندمدت ضروری است. به‌منظور حمایت از جمعیت جهان که به‌سرعت در حال افزایش بوده، شیوه‌هایی مانند تبدیل جنگل‌ها به زمین زراعی و استفاده بیشتر از آفت‌کش‌ها و کودها اتخاذ شده است. همه این فعالیت‌ها منجر به افزایش بیش از شصت درصدی انتشار آلودگی‌های بخش کشاورزی شده است (Fróna et al., 2019). در نتیجه، کشورهای در حال توسعه نسبت به گرمایش جهانی بسیار حساس‌ترند و تغییرات اقلیمی تأثیرات بیشتری بر این‌گونه کشورها خواهد داشت (Chandio et al., 2024).

ایران نیز که کشوری در حال توسعه محسوب می‌شود، از تغییرات اقلیم اثرات منفی پذیرفته است. موقعیت ژئوپولتیک [یا به تعبیر برخی صاحب‌نظران، جغرافیای سیاسی] ایران، در کنار کمیابی

منابع آب، تحریم‌ها و شرایط اقلیمی و میزان شاخص توسعه انسانی[1]، ضرورت مدل‌سازی با هدف کمی‌سازی روابط متغیرهای اثرگذار کشور را بیش از پیش مشخص می‌سازد. ایران، در شاخص توسعه انسانی، از ۰/۶۱۳ در سال ۱۹۹۰ به ۰/۷۸ در سال ۲۰۲۲ رسیده و رتبه ۷۸ را در دنیا به خود اختصاص داده است (Conceição, 2020). همچنین، در زمینه منابع انرژی، رتبه سوم تولید گاز و رتبه هشتم تولید نفت دنیا و از منظر دارا بودن منابع نفت و گاز نیز به‌ترتیب، رتبه سوم و رتبه دوم جهان در اختیار ایران است (IEA, 2023).

بر پایهٔ داده‌های یادشده، علی‌رغم افزایش اشتغال و سهم قابل توجه بخش کشاورزی از تولید ناخالص ایران، مصرف انرژی و انتشار آلودگی در کشور افزایش یافته است، که کشور را با مشکلات جدی زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی مواجه خواهد کرد. از این‌رو، مطالعه عوامل مؤثر بر امنیت غذایی (تولیدات بخش کشاورزی) ضروری می‌نماید. مطالعه حاضر به‌نوعی اولین مطالعه‌ای است که ضمن بررسی اثرات متغیرهایی مهم همچون انرژی، نیروی کار و محیط زیست (انتشار CO_2)، به بررسی نقش سرمایه انسانی در امنیت غذایی نیز پرداخته است. همچنین، مصرف انرژی به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم که هم در امنیت غذایی نقش داشته و هم یکی از منابع اصلی انتشار آلودگی است، به‌تفکیک انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر[2] در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار گرفته است.

مبانی نظری

امنیت غذایی، تغییرات اقلیم و محیط زیست

میان آلودگی، رشد اقتصادی کشاورزی و تولید مواد غذایی رابطه‌های متقابل و پیچیده وجود دارد. بخش کشاورزی، در راستای افزایش تولید برای پاسخ‌گویی به افزایش تقاضای مواد غذایی، از کودها و آفت‌کش بیشتری استفاده می‌کند؛ همچنین، افزایش مصرف انرژی که بخش قابل توجه آن سوخت‌های فسیلی (گازوئیل و گاز طبیعی) است، در همین راستا اجتناب‌ناپذیر است. هر دو عامل یادشده نیز آلاینده‌هایی را منتشر می‌کنند. از سوی دیگر، با تأثیرات آلودگی هوا بر تولید مواد غذایی و کاهش منابع موجود برای پاسخ‌گویی به سطح تقاضا، از دست رفتن تولیدات کشاورزی و به‌دنبال آن، ضررهای اقتصادی نیز به‌همراه خواهد داشت (Wei et al., 2014). افزایش غلظت CO_2 در جو زمین برای رشد گیاه مفید است. سطوح بالاتر CO_2 عاملی برای تحریک فروغ‌آمایی (فتوسنتز) و توسعه گیاهان شناخته

1. Human Development Index (HDI)
2. renewable and non-renewable energies

شده است؛ این فرآیند به‌طور بالقوه باعث افزایش عملکرد غلات می‌شود که مهم‌ترین منبع غذایی به‌شمار می‌روند (Lobell & Field, 2008; Affoh et al., 2022).

شدت انرژی در بخش کشاورزی برای عملیات‌های کشاورزی برای برآوردن نیاز غذایی پیش‌بینی‌شده روندی صعودی داشته که بر شیوع مسائل زیست‌محیطی افزوده است. بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که تولید کشاورزی و انرژی با یکدیگر ارتباط دارند، زیرا افزایش قیمت نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ نه‌تنها منجر به افزایش هزینه‌های مرتبط با نهاده می‌شود، بلکه به افزایش قیمت مواد غذایی نیز می‌انجامد (Woods et al., 2010; Behera & Sahoo, 2022). از سوی دیگر، برآوردن تقاضای غذایی پیش‌بینی‌شده با افزایش احتراق سوخت فسیلی، مصرف زیست‌توده و جنگل‌زدایی همراه است که به‌دلیل کاهش تنوع زیستی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، منجر به کاهش کیفیت محیط‌زیست خواهد شد و بر تولید محصولات نیز تأثیرگذار خواهد بود (Pendrill et al., 2019).

دی‌اکسیدکربن (CO_2)، به‌گونه‌ای گسترده، محرک اصلی چالش‌های آب‌وهوایی شناخته می‌شود. در دو قرن گذشته، غلظت CO_2 در جو زمین همواره افزایش چشمگیر داشته که به‌دلیل سهم قابل توجه آن در تغییرات آب‌وهوایی، با خطر قابل توجه برای تولیدات کشاورزی نیز همراه بوده و با این همه، با بهبود کارآیی مصرف آب گیاهان، از توان ایجاد نتایج سودمند نیز برخوردار است. محققان به ارائه نتایج متفاوت از اثرات تغییرات اقلیم بر بخش کشاورزی پرداخته‌اند. به دیگر سخن، میزان آسیب‌پذیری، نوع و میزان اثرگذاری تغییرات آب‌وهوایی در مناطق و محصولات مختلف متفاوت است (Kumar et al., 2021; Chandio et al., 2024). اثرات مستقیم و غیرمستقیم شرایط اقلیمی بر همه جنبه‌های بخش کشاورزی شامل درختان، محصولات زراعی، دام، کشاورزی، باغبانی و شیلات تأثیر می‌گذارد (Delgado et al., 2021). این عوامل باعث کاهش بهره‌وری کشاورزی و کیفیت محصول می‌شود. برخی تخمین‌ها نشان می‌دهند که تا پایان قرن حاضر، کاهش در عملکرد برخی محصولات ممکن است تا ۴۶ درصد افزایش یابد (Asfew et al., 2023). تلفات محصولات کشاورزی و افزایش هزینه‌های عملیاتی به نظام‌های تولید غذای جهانی آسیب می‌رساند و با ایجاد مخاطراتی در ثبات عرضه مواد غذایی، امنیت غذایی جهانی را نیز به خطر می‌اندازد (Di Falco & Veronesi, 2013; Chandio et al., 2024).

انتشار گاز دی‌اکسید کربن برای فروغ‌آمایی، رشد محصول، عملکرد، بهره‌وری آب و محافظت در برابر آفات و بیماری‌ها ضروری است. دماهای بالاتر، همچنین، تحمل محصول را در برابر عوامل پرفشار یا استرس‌زای محیطی، رشد ریشه و ارزش غذایی بهبود می‌بخشد (Khurshid & Abid, 2024).

امنیت غذایی و شاخص توسعه انسانی (HDI)

در محیطی که فقر و ناامنی غذایی به‌گونه‌ای فزاینده بر جامعه فشار وارد می‌کند، مفهوم توسعه انسانی (به‌عنوان بخشی از توسعه پایدار) می‌تواند نقشی مهم در سطح زندگی مناسب ایفا کند، زیرا هدف آن گسترش انتخاب‌های مردم است. توسعه پایدار به‌گونه‌ای گسترده به‌عنوان یک پاسخ سیاسی، حقوقی و اخلاقی جامعه بین‌المللی به مسائل کلیدی جهانی مرتبط با محیط‌زیست و توسعه پذیرفته شده است (Can et al., 2023).

شاخص توسعه انسانی (HDI) شامل سه مؤلفه (سلامت، آموزش و قدرت خرید) است که بر میزان موفقیت توسعه تأثیر می‌گذارد. شاخص HDI یک شاخص توسعه در یک منطقه است که با شرایط فقر در آن منطقه همبستگی منفی دارد. پایین بودن شاخص توسعه انسانی (HDI) یکی از دلایل فقر است. بنابراین، زمانی که ارزش HDI در یک منطقه بالا باشد، در حالت ایده‌آل، کیفیت زندگی جامعه بهتر می‌شود و نرخ فقر نیز پایین است (Lamba et al., 2020; Fahrika et al., 2020). مؤلفه‌های شاخص توسعه انسانی (HDI) عبارت‌اند از نرخ امید به زندگی که موفقیت در بخش سلامت را نشان می‌دهد، میزان باسوادی و میانگین طول تحصیل که موفقیت در زمینه آموزش را اندازه‌گیری می‌کند و همچنین، برابری قدرت خرید جامعه نسبت به نیازهای اساسی که از میانگین هزینه سرانه مشاهده می‌شود (Alhudhori, 2017).

اخیراً از شاخص توسعه انسانی به‌صورت فراگیر استفاده می‌شود، چراکه عوامل اجتماعی- اقتصادی مانند آموزش، سلامت و همچنین، شاخص‌های مالی (تولید ناخالص ملی) را پوشش می‌دهد. این شاخص به‌عنوان گامی مهم به‌سوی اندازه‌گیری دقیق‌تر و جامع‌تر رفاه اجتماعی- اقتصادی قلمداد می‌شود (Conceição, 2020; Bernard et al., 2022). توسعه پایدار در کشاورزی بدون دستیابی به دانش و مهارت (سرمایه انسانی) امکان‌پذیر نیست. سرمایه انسانی با رشد بهره‌وری می‌تواند به‌گونه‌ای چشمگیر به افزایش کارآمدی بینجامد و به افزایش درآمد کشاورزان کمک کند. همچنین، فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست در کشورها نیز بیشتر به‌کار گرفته خواهد شد (Çakar et al., 2021).

امنیت غذایی سطح بالا، از طریق افزایش امید به زندگی، بعد سلامتی را بهبود می‌بخشد. همچنین، امنیت غذایی خوب بر آمادگی دانش‌آموزان برای انجام تحصیلات تأثیر مثبت دارد و در نتیجه، میانگین مدت‌زمان تحصیل را نیز افزایش می‌دهد. ارتقای امنیت غذایی بر بهره‌وری کارکنان نیز می‌افزاید، به‌گونه‌ای که با افزایش درآمد کارگران، رفاه جامعه را که با میانگین هزینه‌های سرانه اندازه‌گیری می‌شود، بهبود می‌بخشد. امنیت غذایی ماهیتی چندبعدی دارد که نه‌تنها به مشکل «در دسترس بودن غذا» مربوط

می‌شود، بلکه جنبه‌های دیگری مانند مقرون‌به‌صرفه بودن، کیفیت، ایمنی و منابع طبیعی را نیز دربرمی‌گیرد (Jakaria & Lutfi, 2022). از آنجا که پیوند آب- انرژی- غذا با توسعه پایدار مرتبط است، ارزیابی مدیریت منابع آب، انرژی و غذا و شاخص توسعه انسانی (HDI) در کنار هم می‌تواند منافعی را برای جامعه ایجاد کند. تأثیری غیرمستقیم بین همبست منابع یا همان پیوند آب- انرژی- غذا و HDI وجود دارد، زیرا مدیریت صحیح منابع ممکن است با امتیازهایی مثبت برای زندگی انسان همراه باشد. در دسترس بودن و دسترسی بیشتر به آب، انرژی و غذا ممکن است سلامت و رفاه انسان را بهبود بخشد و همچنین، فناوری‌های نوین نیز احتمالاً اثرات زیست‌محیطی را کاهش خواهد داد. از آنجا که شاخص توسعه انسانی بر اساس سطح تحصیلات، تولید ناخالص داخلی (GDP) و امید به زندگی محاسبه می‌شود، به احتمال زیاد، در مناطق دارای مدیریت خوب بر منابع اساسی زندگی (آب، انرژی و غذا)، جمعیت از کیفیت زندگی بهتر و توسعه انسانی بیشتر برخوردارند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که آب، انرژی و غذا منابع ضروری برای رفاه انسان به‌شمار می‌روند و با توسعه پایدار ارتباط تنگاتنگ دارند (Cansino-Loeza et al., 2024). توسعه انسانی منجر به رشد اقتصادی می‌شود، زیرا از رهگذر آموزش باکیفیت‌تر، سلامت بهتر و سطوح بالاتر زندگی، با سازندگی بیشتر یک کشور، در نهایت، رشد اقتصادی آن فراگیرتر می‌شود (Mangaraj & Aparajita, 2020; Bernard et al., 2022). بهره‌وری کشاورزی را می‌توان با نیروی کار ماهر، بهبود آموزش، و انتشار دانش فنی بهبود بخشید. با این همه، سرمایه انسانی منبعی حیاتی در افزایش تولیدات کشاورزی (امنیت غذایی) به‌شمار می‌رود (Azam et al., 2023).

امنیت غذایی و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر

رابطه میان انرژی و بخش کشاورزی پیچیده و دوطرفه است، چراکه هر دو بخش بر یکدیگر تأثیر قابل توجه دارند. انرژی در بخش‌های مختلف صنعت کشاورزی از آماده‌سازی زمین تا زنجیره ارزش محصولات غذایی، تکثیر دام و گلخانه‌ها مورد نیاز است. بنابراین، صنعت کشاورزی به مقدار قابل توجه انرژی مصرف می‌کند. حدود سی درصد از مصرف انرژی جهانی توسط نظام‌های کشاورزی- غذایی و بیشتر در مراحل پس از برداشت مصرف می‌شود (IRENA& FAO, 2021). از دیگر سو، از آنجا که منابع تأمین‌کنندهٔ سوخت‌های زیستی و زیست‌گاز (بیوگاز) را محصولات کشاورزی و دام تشکیل می‌دهند، تولید انرژی نیز می‌تواند به‌طور مستقیم به کشاورزی وابسته باشد. ۵۵ درصد از کل انرژی‌های تجدیدپذیر و بیش از شش درصد از منابع انرژی جهان از انرژی زیستی نوین تأمین می‌شود که از این‌رو، حتی به‌عنوان مهم‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر در سراسر جهان در نظر گرفته می‌شود (Hodgson et al., 2022).

انتقال به منابع انرژی کم کربن نیازمند بخش کشاورزی کارآمدتر و پایدارتر است، اما به تأمین انرژی ایمن، ارزان و پاک نیز نیاز دارد .همچنین، عوامل مختلف اجتماعی، اقتصادی و محیطی مانند گسترش جمعیت، شهرنشینی، کمبود آب، تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری زمین بر انرژی تأثیر می‌گذارند. مجموعه این عوامل، در نهایت، منجر به پیچیدگی بیشتر کشاورزی و انرژی خواهد شد. بنابراین، بررسی رابطه آنها نیازمند یک رویکرد جامع و دقیق است (Kabir & Ekici, 2024). از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان در بخش کشاورزی، برای آبیاری و سایر عوامل پایداری کشاورزی استفاده کرد. با این همه، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش کشاورزی بسیار مورد توجه و حمایت است، چراکه استفاده از انرژی‌های خورشیدی و بادی در گرمایش، روشنایی، خشک‌کنی محصول و انتقال آب برای آبیاری در مزرعه امکان‌پذیر است. همچنین، انرژی زمین‌گرمایی یکی از اجزای اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر است که از آن برای گرم کردن خاک در مزارع و خشک کردن محصولات کشاورزی نیز استفاده می‌شود. علاوه بر این، انرژی آبی یکی از منابع مفیدتر انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید برق، آب آشامیدنی پاک و آبیاری است (Azam et al., 2023).

با بهره‌برداری و استفاده پایدار از منابع طبیعی برای نسل حاضر، در شرایط تغییرات اقلیم و آلودگی‌های زیست‌محیطی (افزایش CO_2)، آیندهٔ بشر به‌خطر افتاده است (Pata, 2021). افزایش سریع انتشار دی‌اکسید کربن باعث گرم شدن کره زمین و تغییرات آب‌وهوایی می‌شود، که تولید مواد غذایی را نیز تهدید می‌کند (Ayyildiz & Erdal, 2021). شرایط آب‌وهوایی جدید (خشکی شدید)، که در نتیجه تغییرات آب‌وهوایی ایجاد شده است، با کاهش تحرکات مواد مغذی و انباشت نمک در خاک، آن را ناسالم و شور می‌کند و در نهایت، حاصل‌خیزی خاک و تولید محصول را کاهش می‌دهد (Arora, 2019). با توجه به نکات یادشده، بخش کشاورزی می‌تواند از طریق سرمایه‌گذاری سبز شامل کاشت درختان و جنگل‌کاری، تأثیرات مثبت بر محیط زیست و نیز نقشی مهم در کاهش انتشار کربن داشته باشد (Pata, 2021, Rehman et al., 2021). انرژی یک نهاده مهم در تولید محصولات کشاورزی است. مصرف انرژی در شخم زدن زمین، تهیه علوفه، تلمبه (پمپاژ) آب برای آبیاری، برداشت و خشک‌کنی محصولات، آسیاب غلات و سایر فعالیت‌های کشاورزی مورد نیاز است (Otim et al., 2023). صنعت کشاورزی، به‌دلیل مصرف بالای سوخت فسیلی، حدود چهارده تا سی درصد از گل انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان را به خود اختصاص داده است. مصرف انرژی در بخش کشاورزی به دو بعد مستقیم و غیرمستقیم قابل تقسیم است. مصرف مستقیم شامل مصرف سوخت مانند گازوئیل، گاز طبیعی و برق برای ماشین‌آلات کشاورزی، آبیاری و چرای دام است؛ و مصرف غیرمستقیم به استفاده بیش از حد از کود و آفت‌کش مربوط می‌شود،

که به آلودگی هوا می‌انجامد. استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی نوین یا کوددهی بیشرفته باعث افزایش بهره‌وری و تأمین نیاز غذایی می‌شود. بنابراین، کشاورزی به‌عنوان یک صنعت مصرف‌کننده انرژی با سهمی بزرگ در تغییرات آب‌وهوایی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با انرژی در نظر گرفته می‌شود. تغییری قابل تصور در آیندهٔ انرژی می‌تواند بخش کشاورزی را به سمت انتشار کربن سوق دهد (Rehman et al., 2019; Koondhar et al., 2020). با توجه به اتکای بیش از حد بخش کشاورزی به نفت خام، هزینه تولید مواد غذایی تا حد زیادی از افزایش قیمت نفت تأثیر می‌پذیرد. بنابراین، هرگونه تکانه (شوک) به قیمت نفت در بازار بین‌المللی به تورم مواد غذایی دامن می‌زند و امنیت غذایی را به چالشی برای اقتصادهای در حال توسعه تبدیل می‌کند. از این‌رو، هدف افزایش عرضه جهانی غذا از طریق بهره‌وری بیشتر محصولات، دام و طیور و غذاهای دریایی ممکن است تا حدودی به‌دلیل در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی ارزان در آینده مختل شود، در حالی که با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌توان بخش کشاورزی را از اثرات منفی تغییر قیمت‌ها نیز حفظ کرد (Rehman et al., 2024). با توجه به وجود شواهد محکم مبنی بر اهمیت کشاورزی برای امنیت غذایی و درآمد، به‌روزرسانی تجزیه‌وتحلیل‌ها پیرامون عوامل مؤثر بر امنیت غذایی و چگونگی تأثیرپذیری کشاورزی از شاخص‌هایی مانند شاخص توسعه انسانی (HDI) ضروری می‌نماید.

پیشینهٔ پژوهش

مهدی‌زاده راینی و همکاران (Mehdizadeh Rayeni et al., 2021)، با استفاده از داده‌های فصلی ۱۳۹۷-۱۳۸۰ و نیز با بهره‌گیری از رهیافت هم‌انباشتگی غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های گسترده[1]، نشان دادند که تکانهٔ مثبت انرژی بر رشد اقتصادی بخش کشاورزی اثر مثبت دارد. همچنین، نتایج پژوهش انوشه‌پور و همکاران (Anooshehpour et al., 2020)، با به‌کارگیری رهیافت رگرسیون چندک[2]، نشان داد که مصرف انرژی دارای اثر منفی بر بهره‌وری بخش کشاورزی است. مهدیی (Mehdi, 2011) نیز با استفاده از مدل خودرگرسیونی با وقفه‌های گسترده[3]، طی سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۷ در ایران، اثر مثبت سرمایه انسانی بر بخش کشاورزی را نشان داد.

افزون بر این، نتایج پژوهش گانی و چاند پراساد (Gani & Chand Prasad, 2007) یک همبستگی مثبت بین در دسترس بودن غذا، کالری و تأمین پروتئین و شاخص توسعه انسانی را تأیید

1. Nonlinear Auto-Regressive Distributed Lags (NARDL)
2. Quantile Regression Approach (QRA)
3. Auto-Aegressive Distributed Lags (ADL)

کرده و همچنین، گویای همبستگی منفی میان دسترسی به غذا (که با قیمت مواد غذایی و آسیب‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود) و توسعه انسانی است. سارکودی و اُووسو (Sarkodie & Owusu, 2017)، در غنا و پاتا (Pata, 2021) در کشورهای عضو گروه برزیل، روسیه، هند، چین و آفریقای جنوبی (بریکس)[1]، نشان دادند که میان انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) و امنیت غذایی رابطه علیت دوطرفه برقرار است. پژوهش اپریلیانا و واهیونینگسیه (Apriliana & Wahyuningsih, 2019) از معدود مطالعاتی است که به‌طور مستقیم، به بررسی اثرات شاخص توسعه انسانی (HDI) بر امنیت غذایی پرداخته است؛ در این پژوهش، نتایج به‌کارگیری رهیافت دومرحله‌ای حداقل مربعات[2] نشان داد که شاخص توسعه انسانی اثر معنی‌دار بر امنیت غذایی در کشور اندونزی نداشته است. نتایج پژوهش کومار و همکاران (Kumar et al., 2021)، در بررسی اثرات تغییر اقلیم (CO_2، افزایش دما و بارش) بر امنیت غذایی (تولید غلات) با استفاده از رهیافت حداقل مربعات معمولی کاملاً اصلاح‌شده[3] و رهیافت حداقل مربعات تعمیم‌یافته فازی[4]، اثر افزایشی CO_2 و بارش را بر امنیت غذایی در کشورهای با درآمد متوسط به پایین نشان داده و همچنین، گویای علیت دوطرفه میان امنیت غذایی و انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) بوده است. نتایج پژوهش افوه و همکاران (Affoh et al., 2022)، با استفاده از مدل پانلی خودرگرسیونی با وقفه‌های گسترده[5]، گویای رابطه مثبت انتشار CO_2 با امنیت غذایی در ۲۵ کشور صحرای جنوب آفریقا طی دوره ۲۰۱۸–۱۹۸۵ بوده است. اسفیو و همکاران (Asfew et al., 2023) نیز با بهره‌گیری از روش گشتاور تعمیم‌یافته[6] طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ در کشورهای آفریقایی، رابطه منفی دما و انتشار دی‌اکسید کربن با تولیدات کشاورزی را نشان دادند. همچنین، نتایج پژوهش اُتیم و همکاران (Otim et al., 2023) در کشورهای آفریقایی طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۹، با به‌کارگیری رهیافت میانگین‌گیری گروه‌هی[7]، نشان داد که CO_2، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و نیروی کار اثر مثبت بر امنیت غذایی (شاخص تولید محصولات) دارند. به باور اعظم و همکاران (Azam et al., 2023)، طی مطالعه‌ای در کشورهای اتحادیه اروپا، انتشار CO_2 اثری معکوس بر امنیت غذایی (بهره‌وری کشاورزی) دارد؛ همچنین، بر اساس نتایج این مظالعه، افزایش انرژی تجدیدپذیر و شاخص سرمایه انسانی منجر به افزایش امنیت غذایی

1. Brazil, Russia, India, China and South Africa (BRICS)
2. Two-Stage Least Squares (TSLS)
3. Fully Modified Ordinary Least Squares (FMOLS)
4. Feasible Generalized Least Squares (FGLS)
5. Panel Auto-Regressive Distributed Lags (PARDL)
6. Generalized Method of Moments (GMM)
7. Pooled Mean Group (PMG)

می‌شود. سونی و آر.ال. (Soni & RL, 2024)، با به‌کارگیری رهیافت ARDL در کشورهای عضو بریکس طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، نشان دادند که اثر مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و انتشار دی‌اکسید کربن بر بهره‌وری بخش کشاورزی مثبت است. بوتسکا و همکاران (Bouteska et al., 2024)، با استفاده از داده‌های ترکیبی طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰، نشان دادند که نیروی کار اثر مثبت بر بهره‌روی بخش کشاورزی اتیوپی دارد. رحکان و همکاران (Rehman et al., 2024) نیز اثرات منفی تغییرات اقلیم و اثرات مثبت انرژی‌های تجدیدپذیر بر امنیت غذایی را طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱، با به‌کارگیری رهیافت همبستگی شرطی پویا[1]در کشورهای جنوب آسیا نشان دادند. همچنین، با اساس نتایج پژوهش چاندیو و همکاران (Chandio et al., 2024) در پاکستان، اثر انتشار CO_2 بر برخی از محصولات باغی منفی و برای برخی دیگر از محصولات مثبت بوده و اثر نیروی کار بر تولید محصولات باغی نیز مثبت است. خورشید و عبید (Khurshid & Abid, 2024) نیز با استفاده از رهیافت غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های گسترده (NARDL) در پاکستان، نشان دادند که در کوتاه‌مدت، هرگونه تکانهٔ انتشار CO_2 (خواه مثبت و خواه منفی) بر امنیت غذایی اثر مثبت خواهد گذاشت؛ همچنین، در بلندمدت، اثر تکانهٔ مثبت و تکانهٔ منفی بر امنیت غذایی، به‌ترتیب، منفی و مثبت خواهد بود.

بررسی مطالعات پیشین مرتبط نشان از آن دارد که در مطالعه امنیت غذایی، از شاخص‌های متفاوت همچون تولید محصولات راهبردی، تولید غلات، تولید دام و تولید غذا استفاده شده است. این مطالعات در کشورها و مناطق مختلف و با رهیافت‌های متفاوت انجام گرفته و در این‌گونه پژوهش‌ها نیز از متغیرهای توضیحی متفاوت در مدل‌های برآوردی استفاده شده است. اما مطالعه‌ای جامع با هدف سنجش اثرات متغیرهای بسیار مهم انرژی (به‌تفکیک تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر)، نیروی کار، تغییر اقلیم (انتشار دی‌اکسید کربن) و شاخص توسعه انسانی بر امنیت غذایی ایران انجام نگرفته است. بنابراین، مطالعه حاضر درصدد انجام این کار برآمده است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها

در پژوهش حاضر، با توجه به اهداف مطالعه مبنی بر بررسی اثرات شاخص توسعه انسانی (HDI) و نیز شاخص‌های انتشار گاز CO_2 (تغییر اقلیم)، نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی (LLAB)، مصرف انرژی تجدیدناپذیر (LENE) و انرژی تجدیدپذیر (RNE) بر امنیت غذایی (شاخص

1. Dynamic Conditional Correlation (DCC)

تولید غذا)، از داده‌های سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ استفاده شده و داده مرتبط با شاخص تولید غذا (شاخص تولید غذا محصولات غذایی را پوشش می‌دهد که خوراکی محسوب می‌شوند و حاوی مواد مغذی هستند) و مصرف انرژی تجدیدپذیر (درصد انرژی از مصرف کل) از بانک جهانی (World Bank) استخراج شده است. داده شاخص توسعه انسانی نیز از برنامه توسعه سازمان ملل (UNDP) استخراج شده است. داده‌های مرتبط با نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی و انتشار CO_2 (حاصل‌جمع انتشار آلودگی مصرف انواع انرژی و کود شیمیایی) از سازمان خواربار و کشاورزی (فائو) و در نهایت، داده مرتبط با مصرف انرژی بخش کشاورزی از سازمان توسعه و همکاری اقتصادی (OECD) استخراج شده و همچنین، شایان یادآوری است که تمامی متغیرها به استثنای مصرف انرژی تجدیدپذیر و شاخص توسعه انسانی به‌صورت لگاریتمی وارد مدل شده، گرچه در بیشتر موارد، ذکری از آن به میان نیامده است.

رهیافت هم‌انباشتگی غیرخطی

برای شروع تجزیه‌وتحلیل، داده‌های سری زمانی در مورد همه متغیرها از پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ گردآوری شد. در مرحله بعد، آزمون‌های ریشه واحد برای بررسی مانایی، روابط کوتاه‌مدت، آزمون BDS برای بررس قرینگی، روابط بلندمدت و آزمون‌های تشخیص (نرمال بودن، ناهمسانی واریانس، خودهمبستگی، CUSUM و CUSUMQ) مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه، به‌تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. رهیافت NARDL توسعه‌یافته توسط شین و همکاران (Shin et al., 2014) برای تعیین روابط نامتقارن بین متغیرهای مستقل و وابسته و تغییرات آنها استفاده می‌شود. مزیت این مدل آن است که می‌تواند برای متغیرهای با درجه انباشتگی متفاوت شامل I_0، I_1 و یا ترکیبی از آنها استفاده شود؛ و علاوه بر این، می‌تواند تأثیرات متفاوت متغیرهای توضیحی را بر اساس تغییرات مثبت و منفی در کوتاه‌مدت و بلندمدت مشخص کند (Bergougui & Aldawsari, 2024). با بررسی وضعیت مانایی متغیرها، مشخص شد که امکان استفاده از مدل NARDL برای پژوهش حاضر وجود دارد. مدل پایه مطالعه حاضر به لحاظ در نظر گرفتن متغیرها، از پژوهش اعظم و همکاران (Azam et al., 2023) استخراج شده و در نهایت، با افزودن متغیرهای نیروی کار بخش کشاورزی و شاخص تولید غذا توسعه داده شده است. بر اساس مطالعات برگوگوی و الدوساری (Bergougui & Aldawsari, 2024) و خورشید و عبید (Khurshid & Abid, 2024) مدل NARDL پژوهش حاضر به‌صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$\begin{aligned}\Delta\mathrm{LFPR} = {} & \alpha_0 + \theta_1 LFPR_{t-1} + {\theta_2}^{+} LHDI_{t-1} + {\theta_2}^{-} LHDI_{t-1} \\ & + {\theta_3}^{+} LENE_{t-1} + {\theta_3}^{-} LENE_{t-1} + {\theta_4}^{+} RNE_{t-1} \\ & + {\theta_4}^{-} RNE_{t-1} + {\theta_5}^{+} LCO2_{t-1} + {\theta_5}^{-} LCO2_{t-1} \\ & + {\theta_6}^{+} LLAB_{t-1} + {\theta_6}^{-} LLAB_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} k_1 \, \Delta LFPR_{t-j} \\ & + \sum_{j=0}^{q-1} (k_2^{+} \Delta \mathrm{L}HDI_{t-j}^{+} + k_2^{-} \Delta \mathrm{L}HDI_{t-j}^{-}) \\ & + \sum_{j=0}^{q-1} (k_3^{+} \Delta \mathrm{LENE}_{t-j}^{+} + k_3^{-} \Delta \mathrm{LENE}_{t-j}^{-}) \\ & + \sum_{j=0}^{q-1} (k_4^{+} \Delta RNE_{t-j}^{+} + k_4^{-} \Delta RNE_{t-j}^{-}) \\ & + \sum_{j=0}^{q-1} (k_5^{+} \Delta \mathrm{LCO2}_{t-j}^{+} + k_5^{-} \Delta \mathrm{LCO2}_{t-j}^{-}) \\ & + \sum_{j=0}^{q-1} (\kappa_6^{+} \Delta \mathrm{LLAB}_{t-j}^{+} + \kappa_6^{-} \Delta \mathrm{LLAB}_{t-j}^{-}) + \varepsilon_t \end{aligned} \qquad (۱)$$

که در آن، θ_1، θ_2، θ_3، θ_4، θ_5 و θ_6 ضرایب کوتاه‌مدت و k_1، k_2، k_3 ، k_4 ، k_5 و k_6 ضرایب بلندمدت، LFPR شاخص تولید غذا، HDI شاخص توسعه انسانی، LENE مصرف انرژی تجدیدناپذیر، RNE مصرف انرژی تجدیدپذیر، LCO_2 انتشار گاز دی‌اکسید کربن و LLAB نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی بوده و همچنین، HDI^{+}، $LENE^{+}$، RNE^{+}، LCO_2^{+} و $LLAB^{+}$ مجموع تجمعی تغییرات جزئی مثبت و HDI^{-}، $LENE^{-}$، RNE^{-}، LCO_2^{-} و $LLAB^{-}$ مجموع تجمعی تغییرات جزئی منفی است.

نتایج و بحث

آزمون‌های ریشه واحد

بررسی وضعیت مانایی متغیرها و مشخص کردن درجه انباشتگی متغیرها پیش از اقدام به مدل‌سازی ضروری است. در پژوهش حاضر، از آزمون دیکی- فولر تعمیم‌یافته[1] و فیلیپس- پرون[2] استفاده شده است. طبق نتایج جدول ۱ و با در نظر گرفتن میزان احتمال، متغیرهای امنیت غذایی (LFPR)، شاخص توسعه انسانی (HDI)، مصرف انرژی تجدیدپذیر (RNE) و نیروی کار بخش کشاورزی (LLAB) در سطح دارای ریشه واحد بوده و با یک بار تفاضل‌گیری، مانا شده‌اند؛ به دیگر سخن، درگیر متغیرهای یادشده I_1 هستند. همچنین، متغیرهای مصرف انرژی تجدیدناپذیر (LENE) و انتشار دی‌اکسید کربن (LCO_2) در سطح مانا هستند.

جدول ۱- نتایج آزمون ریشه واحد دیکی- فولر تعمیم‌یافته (ADF) و فیلیپس- پرون (PP)

متغیرها	توضیحات	آزمون ریشه واحد ADF		آزمون ریشه واحد PP		درجه انباشتگی
		سطح	تفاضل مرتبه اول	سطح	تفاضل مرتبه اول	
LFPR	لگاریتم امنیت غذایی	-۱/۷ (۰/۷)	-۷/۸ (۰/۰۰)	-۱/۳ (۰/۸۵)	-۱۸/۰۸ (۰/۰۰)	I_1
HDI	لگاریتم شاخص توسعه انسانی	۰/۴۹ (۰/۹۹)	-۴/۶ (۰/۰۰)	۰/۶ (۰/۹۹)	-۴/۷ (۰/۰۰)	I_1
LENE	لگاریتم مصرف انرژی تجدیدناپذیر بخش کشاورزی	-۳/۴ (۰/۰۵)	-	-۳/۵ (۰/۰۵)	-	I_0
RNE	مصرف انرژی تجدیدپذیر (درصد)	-۲/۳ (۰/۳۸)	-۵/۱ (۰/۰۰)	-۲/۳ (۰/۴۱)	-۶/۴ (۰/۰۰)	I_1
LCO_2	لگاریتم انتشار آلودگی بخش کشاورزی	-۳/۸ (۰/۰۲)	-	-۳/۷ (۰/۰۳)	-	I_0
LLAB	لگاریتم نیروی کار بخش کشاورزی	-۱/۶ (۰/۷۳)	-۵/۴ (۰/۰۰)	-۱/۷ (۰/۷۱)	-۵/۴ (۰/۰۰)	I_1

در آزمون‌های ADF و PP، مقادیر بحرانی در سطوح یک، پنج و ده درصد، به‌ترتیب، ۴/۲-، ۳/۵- و ۳/۲- بوده و اعداد داخل پرانتز نیز میزان احتمال است. مأخذ: یافته‌های پژوهش

1. Augmented Dickey–Fuller (ADF)
2. Philips-Perron (PP)

نتایج تخمین الگوی کوتاه‌مدت

نتایج مرتبط با تخمین کوتاه‌مدت در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان از آن دارد که تکانهٔ مثبت شاخص سرمایه انسانی اثری مثبت و تکانهٔ منفی همین شاخص اثری منفی بر امنیت غذایی خواهد گذاشت، به‌گونه‌ای که با افزایش و کاهش یک درصدی شاخص، امنیت غذایی، به‌ترتیب، ۳/۰۹ درصد افزایش و ۱۷/۰۶ درصد کاهش خواهد یافت. تکانهٔ مثبت مصرف انرژی در کوتاه‌مدت با ضریب ۰/۰۳ اثری مثبت بر میزان تولید در بخش کشاورزی می‌گذارد؛ اما به لحاظ آماری، معنی‌دار نیست. تکانهٔ منفی انرژی نیز اثری منفی بر امنیت غذایی دارد، به‌گونه‌ای که با یک درصد کاهش مصرف انرژی، امنیت غذایی نیز به میزان ۰/۰۱ درصد کاهش خواهد یافت. ضرایب اثرات تکانه‌های مثبت و منفی انتشار دی‌اکسید کربن معنی‌دار و مثبت است، به‌گونه‌ای که با افزایش یک درصدی میزان انتشار، شاخص امنیت غذایی، به‌ترتیب، به میزان ۰/۱۸ و ۰/۳۴ درصد افزایش خواهد یافت. تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر مثبت و غیرمعنی‌دار است؛ در مقابل، تکانهٔ منفی انرژی تجدیدپذیر اثر تعدیل‌کننده بر امنیت غذایی دارد و با یک درصد کاهش آن، امنیت غذایی ۰/۱۲ درصد کاهش خواهد یافت. در نهایت، متغیر نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی نیز رابطه‌ای مستقیم با امنیت غذایی دارد و تکانهٔ مثبت آن منجر به افزایش امنیت غذایی به میزان ۰/۸۹ درصد خواهد شد. همچنین، تکانهٔ منفی به میزان ۰/۶۷ درصد امنیت غذایی را کاهش خواهد داد. نکته مهم دیگر در جدول ۲ ضریب مربوط به ECM(-1) یا ضریب تصحیح خطاست که سرعت تعدیل فرآیند عدم تعادل را بیان می‌کند. در پژوهش حاضر، مقدار این ضریب ۰/۸۶- به‌دست آمده که با توجه به میزان احتمال (کمتر از ۰/۰۵) و منفی بودن مقدار آن، از نظر آماری، معنی‌دار است. از آنجا که داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر سالانه است، می‌توان گفت که در هر سال، مقدار ۸۶ درصد از عدم تعادل از بین می‌رود و سرعت فرآیند تعدیل تکانه‌های وارده بالاست و به‌طور تقریبی، به مدل ۱/۵ سال زمان نیاز دارد.

جدول ۲- نتایج تخمین الگوی کوتاه‌مدت ARDL(1,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0)

متغیرها	توضیحات	ضرایب	آماره t	احتمال
$DHDI^{+}$	تکانهٔ مثبت سرمایه انسانی	۳/۰۹	۳/۵	۰/۰۰
$DLHDI^{+}(-1)$	تکانهٔ مثبت سرمایه انسانی با یک وقفه	۵/۷	۹/۹	۰/۰۰
$DHDI^{-}$	تکانهٔ منفی سرمایه انسانی	−۱۷/۰۶	−۲/۸	۰/۰۱
$DLENE^{+}$	تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدناپذیر	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۸
$DLENE^{+}(-1)$	تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدناپذیر با یک وقفه	−۰/۱۷	−۲/۰۶	۰/۰۵
$DLENE^{-}$	تکانهٔ منفی مصرف انرژی تجدیدناپذیر	−۰/۰۱	−۰/۸۵	۰/۴
$DLENE^{-}(-1)$	تکانهٔ منفی مصرف انرژی تجدیدناپذیر با یک وقفه	۰/۳۱	۲/۵	۰/۰۲
$DLCO_2^{+}$	تکانهٔ مثبت انتشار کربن	۰/۱۸	۳/۸	۰/۰۰
$DLCO_2^{-}$	تکانهٔ منفی انتشار کربن	۰/۳۴	۴/۸	۰/۰۰
RNE^{+}	تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر	۰/۰۴	۱/۳	۰/۲
RNE^{-}	تکانهٔ منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر	−۰/۱۲	−۲/۳	۰/۰۳
$RNE^{-}(-1)$	تکانهٔ منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر با یک وقفه	−۰/۱۳	−۲/۸	۰/۰۱
$LLAB^{+}$	تکانهٔ مثبت نیروی کار	۰/۸۹	۲/۲	۰/۰۴
$LLAB^{+}(-1)$	تکانهٔ مثبت نیروی کار با یک وقفه	−۰/۷۴	−۴/۵	۰/۰۰
$LLAB^{-}$	تکانهٔ منفی نیروی کار	−۰/۶۷	−۳/۴	۰/۰۰
ECM (-1)	ضریب تعدیل	−۰/۸۶	−۱۱/۶	۰/۰۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج آزمون اثرات نامتقارن در کوتاه‌مدت (جدول ۳)، فرضیه صفر برای متغیرها رد شده است. به دیگر سخن، اثرات تکانه‌های منفی و مثبت متغیرها متفاوت (نامتقارن) خواهد بود.

جدول ۳- آزمون والد (عدم تقارن) کوتاه‌مدت

آماره	آماره t	آماره F	آماره X^2
مقدار آماره	۷/۹	۶۲/۴	۶۲/۴
احتمال	(۰/۰۰)	(۰/۰۰)	(۰/۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

آزمون F کرانه

پیش از اقدام برای بررسی وجود رابطه بلندمدت، بررسی آماره F ضروری است (Bergougui & Aldawsari, 2024)، که نتایج آن در جدول ۴ آمده است. در این آزمون، با توجه به میزان آماره F

محاسباتی و بیشتر بودن مقادیر به‌دست‌آمده از مقادیر بحرانی در سطوح ۲/۵، پنج و ده درصد، وجود رابطه بلندمدت میان متغیرهای مطالعه حتمی است. بنابراین، می‌توان به بررسی روابط بلندمدت پرداخت.

جدول ۴- نتایج آزمون کرانه

نتیجه آزمون	آماره F	I_1Bound	I_0Bound	سطوح معنی‌داری
تأیید وجود رابطه بلندمدت	۶/۹	۳/۱۶	۲/۰۷	٪ ۱۰
		۳/۴۶	۲/۳۳	٪ ۵
		۳/۷۶	۲/۵۶	٪ ۲/۵
		¼	۲/۸۴	٪ ۱

مأخذ: یافته‌های پژوهش

آزمون قرینگی BDS

برای بررسی توان (پتانسل) غیرخطی بودن متغیرها، آزمونی توسط بروک و همکاران (Broock et al., 1996) توسعه یافته است. فرضیه صفر این آزمون توزیع خطی متغیرهاست؛ به دیگر سخن، اگر مقادیر به‌دست‌آمده از آزمون از مقادیر بحرانی کمتر باشد، به معنی خطی‌بودن متغیرهاست (Bergougui & Aldawsari, 2024). با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در جدول ۵، تمامی متغیرها، غیرخطی هستند (به‌دلیل بیشتر بودن مقادیر محاسباتی از مقادیر بحرانی).

جدول ۵- آزمون قرینگی BDS

متغیرها	ابعاد				
	۲	۳	۴	۵	۶
LFPR	۰/۱۶***	۰/۲۹***	۰/۳۸***	۰/۴۳***	۰/۴۵***
HDI	۰/۲***	۰/۳۴***	۰/۴۴***	۰/۵۱***	۰/۵۶***
LENE	۰/۱***	۰/۱۸***	۰/۲۲***	۰/۲۳***	۰/۲۲***
LCO_2	۰/۰۵***	۰/۰۷***	۰/۰۶***	۰/۰۸***	۰/۰۸***
RNE	۰/۰۷***	۰/۰۹***	۰/۱***	۰/۱۱***	۰/۱۱***
LLAB	۰/۱۴***	۰/۲۴***	۰/۲۹***	۰/۳۱***	۰/۳۲***

***، ** و *، به‌ترتیب، معنی‌داری در سطوح یک، پنج و ده درصد

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نتایج تخمین بلندمدت

نتایج مرتبط با تخمین بلندمدت در جدول ۶ آمده است. نتایج نشان از آن دارد که مانند تخمین دوره کوتاه‌مدت، شاخص توسعه انسانی رابطه‌ای مستقیم با امنیت غذایی دارد؛ به دیگر سخن، تکانهٔ مثبت شاخص سرمایه انسانی اثری مثبت و تکانهٔ منفی همین شاخص اثری منفی بر امنیت غذایی خواهد گذاشت، به‌گونه‌ای که با افزایش و کاهش یک درصدی شاخص سرمایه انسانی، امنیت غذایی، به‌ترتیب، ۳/۰۹ درصد بهبود و ۱۷/۰۶ درصد کاهش خواهد یافت. رابطه مصرف انرژی تجدیدناپذیر، برخلاف تخمین دوره کوتاه‌مدت، معکوس است. تکانهٔ مثبت این متغیر غیرمعنی‌دار و تکانهٔ منفی آن با ضریب ۰/۳۴ درصد منجر به افزایش امنیت غذایی خواهد شد. ضرایب اثرات تکانه‌های مثبت و منفی انتشار دی‌اکسید کربن معنی‌دار و مثبت است، به‌گونه‌ای که با افزایش یک درصدی میزان انتشار، شاخص امنیت غذایی، به‌ترتیب، ۰/۲۱ و ۰/۳۹ درصد افزایش خواهد یافت. تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر مثبت و غیرمعنی‌دار است؛ در مقابل، تکانهٔ منفی انرژی تجدیدپذیر اثر تعدیل‌کننده بر امنیت غذایی دارد و کاهش یک درصدی آن منجر به کاهش امنیت غذایی به میزان ۰/۳ درصد خواهد شد. در نهایت، متغیر نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی نیز رابطه‌ای مستقیم با امنیت غذایی داشته است. تکانهٔ مثبت نیروی کار در بلندمدت غیرمعنی‌دار است، در حالی که تکانهٔ منفی آن به میزان ۰/۷۸ درصد امنیت غذایی را کاهش خواهد داد.

جدول ۶- نتایج تخمین الگوی بلندمدت ARDL(1,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0)

متغیرها	توضیحات	ضرایب	آماره t	احتمال
HDI^+	تکانهٔ مثبت سرمایه انسانی	۱۰/۲	۱۰/۸	۰/۰۰
HDI^-	تکانهٔ منفی سرمایه انسانی	−۱۹/۷	−۳/۲	۰/۰۰
$LENE^+$	تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدناپذیر	−۰/۱۵	−۰/۶۱	۰/۵۴
$LENE^-$	تکانهٔ منفی مصرف انرژی تجدیدناپذیر	۰/۳۴	۲/۶	۰/۰۲
LCO_2^+	تکانهٔ مثبت انتشار دی اکسید کربن	۰/۲۱	۳/۴	۰/۰۰
LCO_2^-	تکانهٔ منفی انتشار دی اکسید کربن	۰/۳۹	۵/۹	۰/۰۰
RNE^+	تکانهٔ مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر	۰/۰۵	۱/۳	۰/۱۹
RNE^-	تکانهٔ منفی مصرف انرژی تجدیدپذیر	−۰/۳	−۴/۵	۰/۰۰
$LLAB^+$	تکانهٔ مثبت نیروی کار بخش کشاورزی	۰/۱۷	۰/۴۴	۰/۶۶
$LLAB^-$	تکانهٔ منفی نیروی کار بخش کشاورزی	−۰/۷۸	−۲/۹	۰/۰۱

مأخذ: یافته‌های پژوهش

با توجه به نتایج آزمون اثرات نامتقارن در بلندمدت (جدول ۷)، فرضیه صفر برای متغیرها رد شده است؛ به دیگر سخن، اثرات تکانه‌های منفی و مثبت متغیرها متفاوت (نامتقارن) خواهد بود.

جدول ۷- آزمون والد (عدم تقارن) بلندمدت

آماره	آماره F	آماره X^2
مقدار آماره	۵/۴	۴۸/۴
احتمال	(۰/۰۳)	(۰/۰۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

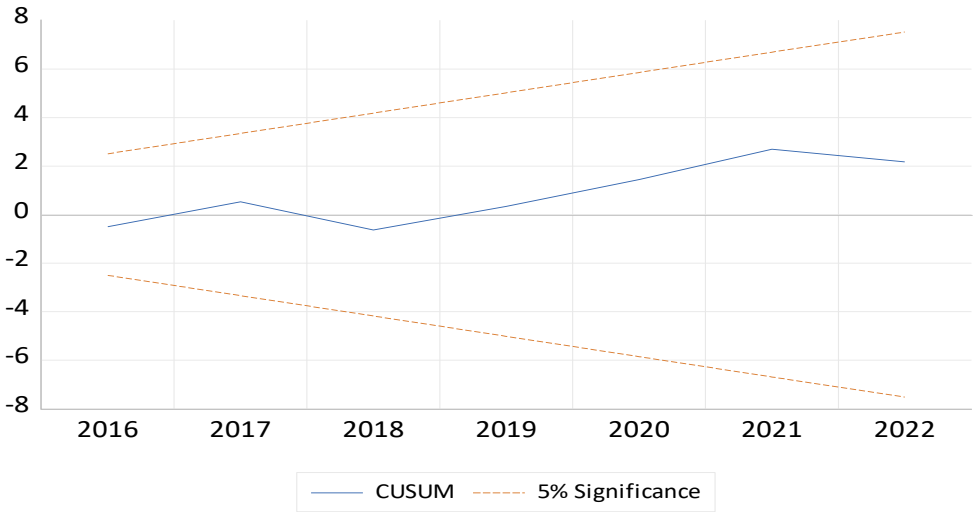
آزمون‌های تشخیص و ثبات مدل

پس از بررسی روابط بلندمدت، بررسی آزمون‌های تشخیص (جدول ۸) و نمودارهای پسماند (CUSUM و CUSUMQ) ضروری است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل برآوردشده از نظر ناهمسانی، خودهمبستگی، نرمال بودن و ثبات مورد تأیید است. همچنین، نمودارها ثبات مدل را نشان می‌دهد، چراکه خط میان دو حد بحرانی حدود را قطع نکرده است.

جدول ۸- آزمون‌های تشخیص

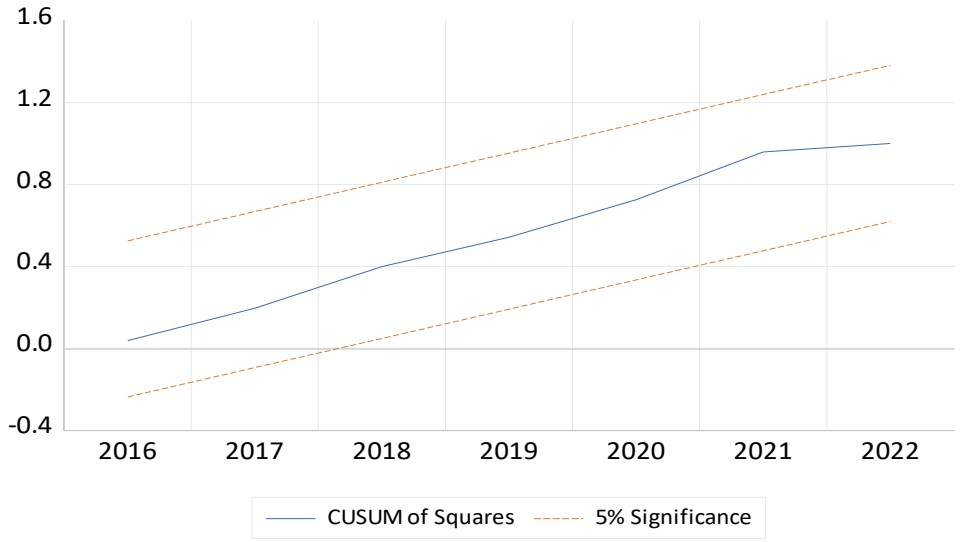
آزمون	آماره	احتمال	وضعیت
آزمون ناهمسانی واریانس	۰/۶۶	۰/۷۸	عدم وجود ناهمسانی
آزمون خودهمبستگی	۳/۵	۰/۱۱	عدم وجود خودهمبستگی
آزمون نرمال بودن	۰/۵	۰/۷۷	نرمال
آزمون ثبات مدل	۰/۰۳	۰/۸۵	مدل باثبات

مأخذ: یافته‌های پژوهش



مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۱- روند پسماند CUSUM



مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۲- روند پسماند CUSUMQ

نتایج آزمون علیت گرنجر

نتایج آزمون علیت در جدول ۹ ارائه شده است. میان انتشار CO_2 و امنیت غذایی رابطه علیت دوطرفه برقرار است. این نتیجه با مطالعات سارکودی و اُووسو (Sarkodie & Owusu, 2017) و کومار و همکاران (Kumar et al., 2021) هم‌راستاست. همچنین، از مصرف انرژی تجدیدناپذیر به امنیت غذایی، از شاخص توسعه انسانی به شاخص امنیت غذایی، از مصرف انرژی تجدیدپذیر به امنیت غذایی و در نهایت از امنیت غذایی به نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی علیت یک‌طرفه وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده نشان از اهمیت توجه مضاعف به بعد زیست‌محیطی مطالعه حاضر دارد. از یک سو، افزایش انتشار کربن می‌تواند بر امنیت غذایی اثرگذار است و از دیگر سو، امنیت غذایی نیز می‌تواند منجر به افزایش انتشار شود. در زمینه انرژی نیز با توجه جهت علیت، اهمیت توجه بیشتر به کاهش مصرف انرژی تجدیدناپذیر و برنامه‌ریزی در راستای افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از مصرف کل نیز ضروری است. شاخص توسعه انسانی هم با توجه به متغیرهای موجود در خود (آموزش، سلامت و اقتصاد) به‌طور حتم بر امنیت غذایی اثرگذار خواهد بود. بهبود شرایط اقتصادی، تحصیلی و بهداشت، سرانجام، منجر به افزایش تولید و حتی مصرف مواد غذایی خواهد شد که در نهایت، به بهبود امنیت غذایی نیز خواهد انجامید.

جدول ۹- نتایج علیت گرنجر

متغیرها و جهت علیت		آماره F	احتمال	وضعیت
جفتی: LCO_2 و LFPR				
LCO_2	LFPR ⟶	۲/۹۸	۰/۰۶	وجود علیت
LFPR	LCO_2 ⟶	۲/۹	۰/۰۷	وجود علیت
جفتی: LENE و LFPR				
LENE	LFPR ⟶	۲/۱	۰/۱۳	عدم وجود علیت
LFPR	LENE ⟶	۲/۶	۰/۰۹	وجود علیت
جفتی: HDI و LFPR				
HDI	LFPR ⟶	۱/۰۴	۰/۳۶	عدم وجود علیت
LFPR	HDI ⟶	۲/۵	۰/۱	وجود علیت
جفتی: RNE و LFPR				
RNE	LFPR ⟶	۱/۶	۰/۲۱	عدم وجود علیت
LFPR	RNE ⟶	۴/۱	۰/۰۲	وجود علیت
جفتی: LLAB و LFPR				
LLAB	LFPR ⟶	۲/۹۷	۰/۰۷	وجود علیت
LFPR	LLAB ⟶	۰/۲۲	۰/۸	عدم وجود علیت

مأخذ: یافته‌های پژوهش

جمع‌بندی و پیشنهادها

پژوهش حاضر به‌دنبال بررسی اثرات تغییر اقلیم (CO_2)، مصرف انرژی (تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر)، شاخص توسعه انسانی و نیروی کار بر امنیت غذایی ایران طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ با استفاده از رهیافت غیرخطی خودرگرسیونی با وقفه‌های گسترده (NARDL) بود و نتایج نشان داد که شاخص توسعه انسانی رابطه‌ای مستقیم با امنیت غذایی ایران داشته، که این نتیجه با مطالعه گانی و چاند پراساد (Gani & Chand Prasad, 2007) هم‌راستا بوده است. برای افزایش کیفیت زندگی انسان‌ها، باید امنیت غذایی تضمین شود. بنابراین، پایش مداوم شرایط اقتصادی توسط دولت‌ها برای تضمین امنیت غذایی و جلوگیری از افزایش تعداد فقرا و کاهش شکاف درآمدی ضروری است. همچنین، باید وجود امکانات بهداشتی مناسب، تأمین غذای کافی، کاهش نوسان‌های تولید مواد غذایی و در نظر گرفتن امتیازات ویژه برای فعالان بخش تولیدی و تسهیل فرآیند فعالیت‌های اقتصادی در اولویت قرار گیرد. برای کمک به حفظ امنیت غذایی، توجه به سطح (استاندارد) زندگی بسیار مهم است. تأمین امنیت مالی مزارع، ایجاد فرصت‌های شغلی خاص با حداقل دستمزد تضمینی، ایجاد انگیزه در زنان برای مشارکت در نیروی کار کشاورزی، بهبود سطوح زندگی در بخش‌های روستایی با هدف افزایش مهاجرت معکوس نیز باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. در کشورهای دارای اقتصاد بسیار وابسته به بخش کشاورزی، شناسایی صنایع سودآور دیگر به‌منظور تنوع‌بخشی به اقتصاد و کاهش اتکای آنها به کشاورزی ضروری می‌نماید. همچنین، برای دستیابی به رشد اقتصادی فراگیرتر، باید توسعه سرمایه انسانی کارآمد در اولویت قرار گیرد، چراکه یکی از دلایل اصلی رشد پایین بهره‌وری در بسیاری از کشورها فقدان مهارت‌های فنی مورد نیاز بخش کشاورزی است. از آنجا که سهم قابل توجه تولیدات کشاورزی به مناطق روستایی تعلق دارد و شاخص توسعه انسانی نیز ترکیبی از آموزش، درآمد و بهداشت است، ارتقای زیرساخت‌های آموزشی و بهداشتی که خود نیز از عوامل اثرگذار بر میزان درآمد است، باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. افزون بر این، شناسایی ظرفیت‌های اقتصادی و سرمایه‌گذاری ویژه در آن در راستای ایجاد اشتغال و بهبود وضعیت درآمدی در مناطق روستایی ضروری است.

رابطه امنیت غذایی با مصرف انرژی تجدیدناپذیر در بخش کشاورزی رابطه‌ای معکوس بوده، که این نتیجه با پژوهش‌های انوشه‌پور و همکاران (Anooshehpour et al., 2020) و مهدی‌زاده راینی و همکاران (Mehdizadeh Rayeni et al., 2021) هم‌راستاست. همچنین، رابطه مصرف انرژی تجدیدپذیر با امنیت غذایی مستقیم است و به دیگر سخن، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر منجر به تقویت امنیت غذایی خواهد شد، که این نتیجه با پژوهش‌های اعظم و همکاران (,.Azam et al

2023)، اُتیم و همکاران (Otim et al., 2023) و سونی و آر.ال. (Soni & RL, 2024) هم‌راستاست. این مهم نشان از آن دارد که با جایگزینی انرژی‌های پاک، می‌توان ضمن حفظ امنیت غذایی، آلودگی را نیز کاهش داد. تکانه‌های مثبت و منفی تغیر اقلیم با جانشینی (پراکسی) انتشار CO_2 اثر مثبت بر امنیت غذایی داشته است. اثر مثبت CO_2 بر امنیت غذایی در پژوهش چاندیو و همکاران (Chandio et al., 2024) و سونی و آر.ال. (Soni & RL, 2024) نیز تأیید شده است. همچنین، اثر معکوس انتشار CO_2 با نتایج پژوهش‌های اعظم و همکاران (Azam et al., 2023) و اسفیو و همکاران (Asfew et al., 2023) هم‌سویی دارد. حرکت از مصرف از شیمیایی و آفت‌کش‌ها به کودهای آلی و پیگیری برنامه‌های مرتبط با کنترل آفات، افزایش تولید و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (پاک) شامل انرژی خورشیدی، زمین‌گرمایی، بادی، و زیست‌توده برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی ضروری است. همچنین، تولید محصولات اصلاح‌شده ژنتیکی کشاورزی با قابلیت مقاومت بالا در برابر آفات و تغییرات اقلیم، ضمن حفظ کیفیت محیط زیست، به حفظ امنیت غذایی نیز کمک خواهد کرد. به‌کارگیری فناوری‌های نوین در بخش کشاورزی برای مقابله با تکانه‌های آب‌وهوایی نیز ضرورت دارد. سامانه‌های آبیاری پیشرفته برای کشت انواع مختلف محصولاتی که به تغییرات آب‌وهوایی حساس نیستند، بسیار مهم است. همچنین، سیاست‌های ترویج کشاورزی ارگانیک به‌منظور کاهش تأثیرپذیری کشاورزی از پدیده تغییرات اقلیم، با هدف افزایش سود و عملکرد محصول، باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. اصلاحات ژنتیکی گیاهان، با هدف مقابله با حوادث طبیعی و تکانه‌های اقلیمی، تنظیم برنامه‌های مؤثر برای حفظ آب باران و هدایت مجدد مازاد به مناطق فاقد آب نیز از دیگر راهکارهای پیشنهادی است.

مطابق نتایج مدل‌سازی پژوهش حاضر، رابطه نیروی کار شاغل در بخش کشاورزی با امنیت غذایی مستقیم بوده، که با نتایج مطالعات بوتسکا و همکاران (Bouteska et al., 2024) و چاندیو و همکاران (Chandio et al., 2024) هم‌راستاست. آگاهی‌بخشی به نیروهای کار شاغل در بخش کشاورزی پیرامون پدیده تغییرات اقلیم و راهکارهای مقابله با آن نیز می‌تواند از دیگر سیاست‌های مؤثر قلمداد شود. افزون بر این، آموزش کارگران برای مقابله با چالش‌های توسعه خاک‌ورزی و به‌کارگیری ماشین‌آلات مناسب و توجه به نوع خاک برای افزایش محصول و حداقل‌سازی تخریب خاک ضروری است. اصلاح شیوه‌های مالکیت زمین به‌منظور جلوگیری از کوچک‌مقیاس شدن مزارع و به دیگر سخن، افزایش اندازه زمین‌های زراعی کشاورزان ضروری می‌نماید. با توجه به چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، باید امنیت غذایی و امنیت انرژی در صدر اولویت‌ها قرار گیرد. اجرای خدمات اقلیمی مانند پیش‌بینی‌های تخصصی هواشناسی و هشدارها می‌تواند کشاورزان را قادر به تصمیم‌گیری آگاهانه،

بهینه‌سازی استفاده از منابع و کاهش تلفات مرتبط با آب‌وهوا سازد و در نهایت، منجر به افزایش به‌کارگیری شیوه‌های کشاورزی انعطاف‌پذیر شود و ثبات تولید را به‌همراه داشته باشد. برای تقویت امنیت غذایی و مبارزه با تغییرات آب‌وهوایی، دوری از سوخت‌های فسیلی و تقویت یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر در کشاورزی بسیار مهم است؛ به‌ویژه، ترویج پانل‌های خورشیدی در مقیاس کوچک در این بخش می‌تواند تولیدات کشاورزی را افزایش داده، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. در پیش گرفتن مجموع اقدامات پیش‌گفته، ضمن افزایش سهم کشاورزی در تولید ناخالص داخلی ملی، آلودگی هوا را از نیز از طریق به‌کارگیری فناوری‌های نوین سازگار با محیط زیست کاهش می‌دهد.

منابع

1. Anooshehpour, A., Moghaddasi, R., Mohammadinejad, A., & Yazdani, S. (2020). The relationship between energy consumption and total factor productivity in agriculture: application of Quantile Regression Approach. *Iranian Energy Economics*, 9(34), 65-85. DOI: 10.22054/jiee.2021.56060.1789. [In Persian]
2. Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95-96. DOI: 10.1007/s42398-019-00078-w.
3. Affoh, R., Zheng, H., Dangui, K., & Dissani, B. M. (2022). The impact of climate variability and change on food security in sub-saharan Africa: perspective from panel data analysis. *Sustainability*, 14(2), 759. DOI: 10.3390/su14020759.
4. Alhudhori, M. (2017). Pengaruh IPM, PDRB dan jumlah pengangguran terhadap penduduk miskin di Provinsi Jambi. *Ekonomis: Journal of Economics and Business*, 1(1), 113-124. [In Indonesian]
5. Apriliana, T., & Wahyuningsih, N. D. (2019). The application of TSLS (Two Stage Least Square) in simulant equation among food security, human development index, and poverty in Indonesia. *Journal of Advanced Research in Dynamical & Control Systems*, 11(03-Special Issue), 535-540.

6. Asfew, M., Mitiku, F., Gemechu, A., Bekele, Y., & Lemma, T. (2023). Do climate change and political instability affect crop production in sub-Saharan Africa countries? *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100576.
7. Ayyildiz, M., & Erdal, G. (2021). The relationship between carbon dioxide emission and crop and livestock production indexes: a dynamic common correlated effects approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 597-610.
8. Azam, A., Shafique, M., Rafiq, M., & Ateeq, M. (2023). Moving toward sustainable agriculture: the nexus between clean energy, ICT, human capital and environmental degradation under SDG policies in European countries. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101252. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101252.
9. Behera, U. K., & Sahoo, P. K. (2022). Energy use in conservation agriculture. In: Conservation Agriculture in India, 199-220. DOI: 10.4324/9781003292487-12.
10. Bergougui, B., & Aldawsari, M. I. (2024). Asymmetric impact of patents on green technologies on Algeria's ecological future. *Journal of Environmental Management*, 355, 120426.
11. Bernard Jr, B. M., Song, Y., Hena, S., Ahmad, F., & Wang, X. (2022). Assessing Africa's agricultural TFP for food security and effects on human development: evidence from 35 countries. *Sustainability*, 14(11), 6411. DOI: 10.3390/su14116411.
12. Bouteska, A., Sharif, T., Bhuiyan, F., & Abedin, M. Z. (2024). Impacts of the changing climate on agricultural productivity and food security: evidence from Ethiopia. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141793.
13. Çakar, N. D., Gedikli, A., Erdoğan, S., & Yıldırım, D. Ç. (2021). Exploring the nexus between human capital and environmental degradation: the case of EU countries. *Journal of Environmental Management*, 295, 113057. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113057.
14. Can, M. F., Mazlum, Y., & Erkan, B. (2023). Is there a relationship between human development and dependence on fisheries? *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 52(2), 245-257.

15. Cansino-Loeza, B., Bazán-Ramírez, S. Y., & Ponce-Ortega, J. M. (2024). Optimizing the water-energy-food nexus system considering the human development index. Process Integration and Optimization for Sustainability, 8(4), 1193-1208. DOI: 10.1007/s41660-024-00422-6.
16. Chandio, A. A., Gokmenoglu, K. K., Joyo, M. A., & Jiang, Y. (2024). Modeling the climate change impacts on major fruits production: recent evidence from Pakistan. *Scientia Horticulturae*, 324, 112618. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112618.
17. Conceição, P. (2020). Human development report 2020: the next frontier—human development and the Anthropocene. Human Development Report Office, UNDP, New York, NY, USA.
18. Delgado, A., Egea, J. A., Luedeling, E., & Dapena, E. (2021). Agroclimatic requirements and phenological responses to climate change of local apple cultivars in northwestern Spain. *Scientia Horticulturae*, 283, 110093. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110093.
19. Di Falco, S., & Veronesi, M. (2013). How can African agriculture adapt to climate change? A counterfactual analysis from Ethiopia. *Land Economics*, 89(4), 743-766.
20. Fahrika, A. I., Salam, H., & Buhasyim, M. A. (2020). Effect of human development index (HDI), unemployment, and investment realization toward poverty in South Sulawesi-Indonesia. *The International Journal of Social Sciences World (TIJOSSW)*, 2(2), 110-116.
21. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO (2020). The state of food security and nutrition in the world 2020: transforming food systems for affordable healthy diets. Rome, FAO.
22. Ferranti, P., Berry, E. M., & Anderson, J. R. (2019). The concept of food security. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, 2, 1-7.
23. Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., & Van Velhuizen, H. (2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2067-2083. DOI: 10.1098/rstb.2005.1744.

24. Fróna, D., Szenderák, J., & Harangi-Rákos, M. (2019). The challenge of feeding the world. *Sustainability*, 11(20), 5816.
25. Gani, A., & Chand Prasad, B. (2007). Food security and human development. *International Journal of Social Economics*, 34(5), 310-319.
26. Hodgson, D., Bains, P., & Moorhouse, J. (2022). Bioenergy–analysis-IEA. International Energy Agsncy (IEA), BIoenergy. France. Available at https://www.iea.org/reports/bioenergy. Retrieved at 17 March, 2023.
27. IEA (2023). World energy outlook 2023. International Energy Agency (IEA), Paris, France.
28. IRENA, & FAO (2021). Renewable energy and agri-food systems: advancing energy and food security towards sustainable development goals and the Paris agreement. International Renewable Energy Agency (IRENA) and Food and Agriculture Organization (FAO), Abu Dhabi and Rome. DOI: 10.4060/cb7433en.
29. Jakaria, J. T., & Lutfi, M. Y. (2022). Food security and human development: difference between potential and reality in Asean countries. Proceedings of the First Lekantara Annual Conference on Public Administration, Literature, Social Sciences, Humanities, and Education, LePALISSHE 2021, August 3, 2021, Malang, Indonesia (p. 116), European Alliance for Innovation.
30. Kabir, M., & Ekici, S. (2024). Energy-agriculture nexus: exploring the future of artificial intelligence applications. *Energy Nexus*, 13, 100263. DOI: 10.1016/j.nexus.2023.100263.
31. Khurshid, N., & Abid, E. (2024). Unraveling the complexity! Exploring asymmetries in climate change, political globalization, and food security in the case of Pakistan. *Research in Globalization*, 8, 100220.
32. Kogo, B. K., Kumar, L., & Koech, R. (2021). Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. *Environment, Development and Sustainability*, 23(1), 23-43.
33. Koondhar, M. A., Li, H., Wang, H., Bold, S., & Kong, R. (2020). Looking back over the past two decades on the nexus between air pollution, energy consumption, and agricultural productivity in China: a qualitative analysis

based on the ARDL bounds testing model. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13575-13589.

34. Kumar, P., Sahu, N. C., Kumar, S., & Ansari, M. A. (2021). Impact of climate change on cereal production: evidence from lower-middle-income countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51597-51611.
35. Lamba, A., Novan, R., Lamba, R. A., & Patma, K. (2020). The impact of economic growth and capital expenditures in supporting quality human development. *The International Journal of Social Sciences World (TIJOSSW)*, 2(2), 100-109.
36. Lobell, D. B., & Field, C. B. (2008). Estimation of the carbon dioxide (CO2) fertilization effect using growth rate anomalies of CO2 and crop yields since 1961. *Global Change Biology*, 14(1), 39-45.
37. Mangaraj, B. K., & Aparajita, U. (2020). Constructing a generalized model of the human development index. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 100778.
38. Mehdi, S. (2011). The effects of human capital on agricultural sector: the case of Iran. *European Journal of Experimental Biology*, 1(4), 55-6.
39. Mehdizadeh Rayeni, M. J., Ziaee, S., Salarpour, M., Mohammadi, H., & Ahmadpour, M. (2021). The asymmetric effects of energy consumption on growth of iran's agricultural sector using Nonlinear Auto-Regression Distributed Lads (NARDL). *Quarterly Energy Economics Review (QEER)*, 16(67), 57-86. [In Persian]
40. Otim, J., Watundu, S., Mutenyo, J., Bagire, V., & Adaramola, M. S. (2023). Effects of carbon dioxide emissions on agricultural production indexes in East African community countries: pooled mean group and fixed effect approaches. *Energy Nexus*, 12, 100247.
41. Pata, U. K. (2021). Linking renewable energy, globalization, agriculture, CO_2 emissions and ecological footprint in BRIC countries: a sustainability perspective. *Renewable Energy*, 173, 197-208.

42. Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., Kastner, T., Moran, D., Schmidt, S., & Wood, R. (2019). Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Global Environmental Change*, 56, 1-10.
43. Pickson, R. B., & Boateng, E. (2022). Climate change: a friend or foe to food security in Africa? *Environment, Development and Sustainability*, 24, 4387-4412. DOI: 10.1007/s10668-021-01621-8.
44. Rahman, M., Chowdhury, M. M. I., Al Amran, M. I. U., Malik, K., ... & Rahman, S. M. (2024). Impacts of climate change on food system security and sustainability in Bangladesh. *Journal of Water and Climate Change*, 15(5), 2162-2187. DOI: 10.2166/wcc.2024.631.
45. Rehman, A., Batool, Z., Ma, H., Alvarado, R., & Oláh, J. (2024). Climate change and food security in South Asia: the importance of renewable energy and agricultural credit. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1-11.
46. Rehman, A., Rauf, A., Ahmad, M., Chandio, A. A., & Zhang, D. Y. (2019). The effect of carbon dioxide emission and the consumption of electrical energy, fossil fuel energy, and renewable energy, on economic performance: evidence from Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 21760-21773. DOI: 10.1007/s11356-019-05550-y.
47. Rehman, M. A., Fareed, Z., Salem, S., Kanwal, A., & Pata, U. K. (2021). Do diversified export, agriculture, and cleaner energy consumption induce atmospheric pollution in Asia? Application of method of moments quantile regression. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 781097.
48. Rosegrant, M. W., Sulser, T. B., Dunston, S., Mishra, A., Cenacchi, N., Gebretsadik, Y., ... & Wiebe, K. (2024). Food and nutrition security under changing climate and socioeconomic conditions. *Global Food Security*, 41, 100755.
49. Sarkodie, S. A., & Owusu, P. A. (2017). The relationship between carbon dioxide, crop and food production index in Ghana by estimating the long-run elasticities and variance decomposition. *Environmental Engineering Research*, 22(2), 193-202. DOI: 10.4491/eer.2016.135.

50. Shin, Y., Yu, B., & Greenwood-Nimmo, M. (2014). Modelling asymmetric cointegration and dynamic multipliers in a nonlinear ARDL framework. In: Sickles, R., Horrace, W. (eds) Festschrift in Honor of Peter Schmidt. Springer, New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4899-8008-3_9.
51. Soni, S., & RL, M. (2024). The dynamic nexus between agricultural productivity and renewable energy consumption in BRICS: the role of financial inclusion and foreign direct investment. *International Journal of Energy Sector Management*, 18(6), 1885-1904. DOI: 10.1108/ijesm-08-2023-0028.
52. Wei, J., Guo, X., Marinova, D., & Fan, J. (2014). Industrial SO2 pollution and agricultural losses in China: evidence from heavy air polluters. *Journal of Cleaner Production*, 64, 404-413.
53. Woods, J., Williams, A., Hughes, J. K., Black, M., & Murphy, R. (2010). Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2991-3006.