

A Dynamic Analysis of the Impact of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions Uncertainty in the Industrial Sector on Iran's Economic Growth

Abstract

The industrial sector, as the largest consumer of fossil energy and a vital pillar of economic development, plays a crucial role in influencing economic growth and environmental changes. The present study aims to dynamically analyze the relationship between the uncertainty of energy consumption and carbon dioxide emissions in the industrial sector and Iran's economic growth, while considering uncertainties in the available data and economic variables. Using data from the Central Bank of Iran and the Energy Balance Sheets, and applying a fuzzy modeling approach over the period 1991–2021, the study estimates the impact of access to electricity, financial development, population, labor force, capital stock, industrial CO₂ emissions, and trade openness on economic growth. The main novelty of this study lies in integrating variable uncertainties into the dynamic analysis of the relationship between energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth. The findings reveal that CO₂ emissions from the industrial sector, capital stock, and trade openness exert the most significant impacts on per capita GDP, with coefficients of 2.302, 0.93, and 0.83, respectively. Moreover, access to electricity shows a significantly positive effect on economic growth with a coefficient of 0.34, while, at the lower bound with a membership degree of 0.9, industrial CO₂ emissions negatively affect economic growth with a coefficient of –2.302. Based on the results, it is recommended that carbon taxation policies and incentives for renewable energy adoption be implemented as strategies to reduce environmental uncertainties and promote sustainable economic growth.

Introduction

Energy consumption in the industrial sector has always been considered one of the most important factors influencing economic growth and the environment. According to the International Energy

Agency (IEA), Iran's fossil energy consumption in its industrial sector is significantly higher than the global average, leading to increased greenhouse gas emissions, particularly carbon dioxide (CO₂). The industrial sector accounts for a major share of total energy consumption in the country, and managing this consumption alongside reducing emissions can play a vital role in achieving sustainable economic development. Recent reports by the IEA (2023, 2024) emphasize that global energy demand has been rising, with a 2.2 percent growth in 2024, mainly due to industrial electricity demand and unprecedented temperature increases. In this context, Iran faces serious challenges related to energy efficiency and emission reduction.

Previous studies such as Shahbaz et al. (2013, 2015) and Mardani et al. (2018, 2019) have analyzed the nexus between energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth. However, a key limitation in many of these works is the neglect of uncertainties in data and variables, which can lead to significant estimation errors. Fuzzy models, with their ability to incorporate imprecise and incomplete data, provide an effective approach for analyzing such relationships under uncertainty. Given Iran's energy crisis in 2024, which resulted in nationwide blackouts due to gas shortages and outdated energy infrastructure, the importance of incorporating uncertainty in analyzing the energy-growth-environment nexus becomes even more critical.

This study seeks to dynamically investigate the effects of industrial energy consumption and CO₂ emissions uncertainty on Iran's economic growth between 1991 and 2021, applying a fuzzy regression model that allows for more realistic estimates under uncertain conditions.

Methods and Material

The research employed annual data from the Central Bank of Iran and the national Energy Balance Sheets for the period 1991–2021. Key explanatory variables include access to electricity, financial development, population, labor force, capital stock, industrial CO₂ emissions, and trade openness.

A possibilistic fuzzy regression model with symmetric coefficients was applied. Unlike classical regression, which requires strong assumptions such as normally distributed errors and homoscedasticity, fuzzy regression relaxes these assumptions and

instead models uncertainty using membership functions. Specifically, triangular membership functions were used to capture the imprecision associated with the explanatory variables and their effects on per capita GDP.

The general form of the fuzzy regression equation is expressed as:

$$\tilde{Y} = f(x, A) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_1 + \tilde{A}_2 x_2 + \dots + \tilde{A}_n x_n \quad (1)$$

where $\tilde{Y}$ is the fuzzy dependent variable (per capita GDP), $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ is the vector of independent variables, and $A = \{\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n\}$ represents fuzzy coefficients. The estimation process minimizes the fuzziness width while ensuring the observed values are covered within the predicted fuzzy intervals at a specified membership degree (e.g., 0.9). Computations were performed in MATLAB software.

Results and Discussion

The fuzzy regression results demonstrate significant impacts of access to electricity, financial development, labor, capital stock, CO₂ emissions, and trade openness on per capita GDP under varying degrees of uncertainty. For example, with a central coefficient of 2.302 at a membership degree of 0.9, CO₂ emissions has the strongest positive impact on per capita GDP. However, under lower membership degrees (0.1), this effect diminishes to -2.302, reflecting uncertainty related to the quality and productivity of labor. Capital exerts a strong positive effect (0.93 at 0.9), highlighting the role of investment in infrastructure, machinery, and technology in boosting production capacity. Interestingly, trade openness shows a dual impact. At higher certainty, the coefficient is positive (0.83), suggesting economic openness initially contributes to output. However, at the lower bound, trade openness exerts a small effect (0.28), emphasizing that trade openness has less significant impact on long-term economic growth. Access to electricity significantly boosts economic growth, with a coefficient of 0.34, confirming the energy-dependence of Iran's industrial production.

Financial development and labour positively affect per capita GDP with coefficients of 0.14 and 0.08, respectively. Financial development increases supply of goods and services, but its effect depends on whether labor productivity and human capital investments are enhanced. Increasing the working-age population fosters economic expansion, though it may also expose the economy to external shocks.

The results collectively demonstrate that uncertainty substantially alters the magnitude of relationships between industrial inputs, CO₂ emissions, and economic growth.

A Dynamic Analysis of the Impact of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions Uncertainty in the Industrial Sector on Iran's Economic Growth

Abstract

The industrial sector, as the largest consumer of fossil energy and a vital pillar of economic development, plays a significant role in both economic growth and environmental changes. This study aims to dynamically analyze the relationship between uncertainty in access to electricity and carbon dioxide (CO₂) emissions in the industrial sector with Iran's economic growth. Using data from the Central Bank and the Energy Balance Sheet of Iran for the period 1991–2021 and applying a fuzzy model, the study examines the impact of uncertainty in access to electricity, financial development, population, labor force, capital stock, industrial CO₂ emissions, and economic openness on per capita GDP. The main innovation of this research lies in integrating variable uncertainties in the dynamic analysis of the relationship between energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth. The results indicate that CO₂ emissions from the industrial sector, capital stock, and trade openness have the highest impacts on per capita GDP, with coefficients of 2.302, 0.93, and 0.83, respectively. Moreover, access to electricity positively and significantly affects economic growth (coefficient 0.34), while at the lower bound with a membership degree of 0.9, industrial CO₂ emissions negatively affect growth (coefficient -2.302). Based on these findings, it is recommended that carbon taxation policies and the promotion of renewable energy be adopted as strategies to reduce environmental uncertainties and enhance sustainable economic growth.

Keywords: CO₂ emissions uncertainty, industrial sector, economic growth, fuzzy model, access to electricity, financial development, sustainable development



بررسی پویای تاثیر عدم قطعیت مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن بخش صنعت بر رشد اقتصادی ایران

دکتری اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

محبوبه خادم نعمت الهی

استادیار گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

رضا اشرف گنجوی

استاد، گروه اقتصاد نظری، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

تیمور محمدی

چکیده

بخش صنعت به عنوان بزرگترین مصرف کننده انرژی فسیلی و یکی از ارکان حیاتی توسعه اقتصادی، نقش مهمی در رشد اقتصادی و تغییرات زیست محیطی ایفا می کند. هدف این مطالعه، تحلیل پویای رابطه میان عدم قطعیت در مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن در بخش صنعت با رشد اقتصادی ایران است. پژوهش حاضر با بهره گیری از داده های بانک مرکزی و ترازنامه انرژی ایران در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ و به کارگیری مدل فازی، تأثیر عدم قطعیت متغیرهای دسترسی به برق، توسعه مالی، جمعیت، نیروی کار، موجودی سرمایه، انتشار CO_2 بخش صنعت و درجه باز بودن اقتصادی بر تولید ناخالص داخلی سرانه را بررسی کرده است. نوآوری اصلی این مطالعه، تلفیق عدم قطعیت متغیرها در تحلیل پویای رابطه میان دسترسی به برق، انتشار CO_2 و رشد اقتصادی است. یافته ها نشان می دهد که انتشار CO_2 بخش صنعت، موجودی سرمایه و باز بودن تجارت به ترتیب با ضرایب ۲.۳۰۲، ۰.۹۳ و ۰.۸۳ بیشترین تأثیر را بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارند. همچنین، دسترسی به برق با ضریب ۰.۳۴ تأثیر مثبت و قابل توجهی بر رشد اقتصادی دارد و در کران پایین با درجه عضویت ۰.۹، انتشار دی اکسید کربن بخش صنعت اثر منفی با ضریب ۲.۳۰۲- بر رشد اقتصادی دارد. بر اساس نتایج، پیشنهاد می شود سیاست های مالیاتی بر کربن و تشویق به استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به عنوان راهکاری جهت کاهش عدم قطعیت های زیست محیطی و ارتقای رشد اقتصادی پایدار اتخاذ گردد.

کلیدواژه ها: عدم قطعیت در انتشار CO_2 ، بخش صنعت، رشد اقتصادی، مدل فازی، دسترسی به برق، توسعه مالی، توسعه پایدار.

مقدمه

مصرف انرژی در بخش صنعت به عنوان یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر رشد اقتصادی و محیط زیست، همواره مورد توجه پژوهشگران و سیاست گذاران بوده است. بر اساس گزارش های آژانس بین المللی انرژی^۱ (۲۰۲۳)، ایران یکی از کشورهای است که مصرف انرژی فسیلی در بخش صنعت آن به طور قابل توجهی بالاتر از میانگین جهانی است و این موضوع باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه ای از جمله دی اکسید کربن (CO₂) شده است. به طوری که بخش صنعت سهم عمده ای در مصرف انرژی کل کشور دارد و کنترل مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده ها در این بخش می تواند نقش مهمی در تحقق توسعه اقتصادی پایدار ایفا کند. در سال های اخیر، مصرف انرژی در بخش صنعت به عنوان محور اصلی توسعه اقتصادی مورد توجه جهانی قرار گرفته است. طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی (۲۰۲۵)، تقاضای جهانی انرژی در ۲۰۲۴ حدود ۲.۲٪ افزایش یافته که عمدتاً ناشی از رشد مصرف برق صنعتی و افزایش دما بوده است. ایران نیز به دلیل وابستگی بالا به انرژی فسیلی با چالش هایی در بهره وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای روبه روست. مردانی و همکاران^۲ (۲۰۱۹) و شهباز و همکاران^۳ (۲۰۱۵ و ۲۰۱۳) به بررسی رابطه مصرف انرژی و رشد اقتصادی پرداخته اند، اما بسیاری از این تحلیل ها عدم قطعیت های موجود در داده ها و متغیرها را نادیده گرفته اند که می تواند به خطاهای قابل توجهی منجر شود. درک روابط میان انتشار CO₂، مصرف انرژی و رشد اقتصادی به کشورهای مختلف کمک می کند تا منابع انرژی خود را توسعه داده و سیاست های انرژی مناسبی برای ارتقاء توسعه پایدار تدوین کنند. شهباز و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از آزمون ریشه واحد زیووت-اندروز و مدل ARDL، رابطه بلندمدت میان رشد اقتصادی، مصرف انرژی، توسعه مالی، بازبودن تجارت و انتشار CO₂ را در اندونزی طی دوره ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۱ بررسی کردند. همچنین، علیت میان متغیرها با روش گرنجر در چارچوب مدل تصحیح خطا (VECM) تحلیل شد. مردانی و همکاران (۲۰۱۸) یک مدل کارآمد نوین برای تحلیل روابط میان این سه شاخص مذکور در کشورهای گروه G20 با استفاده از مدل سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) در دوره زمانی ۱۹۶۲ تا ۲۰۱۶ مطرح کردند. آن ها مدل ANFIS به همراه مدل های پیش بینی با

¹ International Energy Agency

² Mardani et al.

³ Shahbaz et al.

استفاده از داده‌های واقعی برای پیش‌بینی انتشار CO₂ بر اساس دو شاخص ورودی مهم، یعنی مصرف انرژی و رشد اقتصادی، استفاده کردند. استفاده از مدل‌های فازی که قابلیت مدیریت عدم قطعیت‌ها را دارند، می‌تواند ابزاری کارآمد برای تحلیل‌های اقتصادی و زیست‌محیطی باشد. مدل‌های فازی به دلیل توانایی در پردازش داده‌های ناقص و غیرقطعی، امکان تحلیل دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تر از تأثیرات مصرف انرژی و انتشار CO₂ بر رشد اقتصادی فراهم می‌آورند. (جری، ۲۰۱۹). در سال ۲۰۲۴، ایران با بحران جدی انرژی مواجه شد که منجر به خاموشی‌های گسترده در سطح کشور گردید. این بحران عمدتاً به دلیل کمبود گاز، فرسودگی زیرساخت‌های انرژی و مصرف بالای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی بود. بر اساس گزارش‌ها، در زمستان ۲۰۲۴، دولت ایران مجبور به اعمال خاموشی‌های سراسری شد که تأثیرات منفی بر فعالیت‌های صنعتی و اقتصادی کشور داشت. (آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۴). تحلیل رابطه مصرف انرژی، انتشار CO₂ و رشد اقتصادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌ها ضروری است. مدل‌های فازی به دلیل انعطاف‌پذیری و توانایی پردازش داده‌های غیرقطعی، دقت پیش‌بینی را بهبود داده و به تصمیم‌گیری بهتر سیاست‌گذاران کمک می‌کنند. سؤال اصلی پژوهش آن است که در شرایط عدم قطعیت دسترسی به برق، توسعه مالی، جمعیت، نیروی کار، سرمایه، بازبودن تجارت و انتشار دی‌اکسید کربن در بخش صنعت چه تأثیری بر رشد اقتصادی ایران دارند. بر همین اساس، پژوهش حاضر با استفاده از مدل رگرسیون فازی، به بررسی این موضوع پرداخته است و با هدف تحلیل دقیق‌تر اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی، راهکارهایی برای بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش آلودگی ارائه می‌دهد. سازماندهی این مقاله به شکل است که: در بخش دوم، مبانی نظری و دیدگاه‌های مرتبط با تأثیر عدم قطعیت بر تولید ناخالص داخلی سرانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش سوم به مرور مطالعات تجربی انجام شده پیرامون تأثیر عوامل موثر بر تولید ناخالص داخلی سرانه اختصاص دارد. روش‌شناسی پژوهش در بخش چهارم تشریح شده و در بخش پنجم، مدل‌سازی تجربی متغیرهای مرتبط با عدم قطعیت در تولید ناخالص داخلی سرانه ارائه می‌شود. در نهایت، بخش ششم به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی کلی تحقیق اختصاص دارد.

پیشینه پژوهش

برخی مطالعات انجام شده به بررسی عدم قطعیت در مصرف انرژی و انتشار CO_2 بخش صنعت و تاثیر آن بر رشد اقتصادی پرداخته‌اند. این مقالات همگی از منابع معتبر بهره برده‌اند و روش‌شناسی‌های پیشرفته‌ای مانند $ARDL$ ، $DYNARDL$ و مدل‌های فازی را به کار گرفته‌اند که برخی از آن‌ها به شرح زیر هستند:

ژوان^۱ (۲۰۲۵)، در مقاله‌ای با عنوان (پیوند میان نوآوری، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر، سرمایه‌گذاری خارجی، تولید ناخالص داخلی و انتشار CO_2 در بستر اقتصاد ویتنام با استفاده از روش $ARDL$) داده‌های سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ ویتنام را تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهد که نوآوری و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در بلندمدت باعث کاهش انتشار CO_2 می‌شوند. در مقابل، سرمایه‌گذاری خارجی (FDI) و رشد اقتصادی (GDP) تاثیر مثبتی بر افزایش آلودگی زیست‌محیطی دارند. او پیشنهاد می‌کند که دولت ویتنام با تقویت فناوری پاک، جذب FDI پایدار و تنوع‌بخشی اقتصادی مسیر رشد سبز و پایدار را دنبال کند.

زو و همکاران^۲ (۲۰۲۵) در مقاله‌ای با عنوان (تاثیر بازبودن تجاری بر انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای نوظهور)، به بررسی رابطه بین بازبودن تجاری، رشد اقتصادی (GDP)، مصرف انرژی و انتشار CO_2 در کشورهای نوظهور پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش‌های $Driscoll-Kraay$ ، $PMG-ARDL$ ، $DOLS$ ، $FMOLS$ و $DCCEMG$ نتایج خود را از نظر پایداری آزمودند. یافته‌ها نشان داد که در بلندمدت، رشد اقتصادی و بازبودن تجاری باعث کاهش انتشار CO_2 می‌شوند، اما مصرف انرژی منجر به افزایش آن است. همچنین، رابطه علیت دوطرفه میان بازبودن تجاری و انتشار CO_2 وجود دارد. آن‌ها توصیه می‌کنند کشورهای نوظهور با توسعه فناوری‌های سبز و گسترش همکاری‌های بین‌المللی به هم‌زمانی رشد تجارت و کاهش کربن دست یابند.

اصلان و همکاران^۳ (۲۰۲۴) در مقاله‌ای با عنوان (تاثیر عدم قطعیت سیاست‌های اقتصادی بر دی‌اکسید کربن با تفکیک مصرف انرژی تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر) به بررسی تاثیر عدم قطعیت سیاست‌های اقتصادی، مصرف انرژی و رشد اقتصادی بر آلودگی محیط‌زیست در کشورهای گروه G7 پرداخته‌اند. این تحقیق دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ را شامل می‌شود و از روش رگرسیون کمی (quantile regression) برای تحلیل داده‌ها استفاده کرده‌اند.

¹ Xuan

² Zhou et al.

³ Aslan et al.

نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدم قطعیت سیاست‌های اقتصادی به‌طور کلی موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود، اثر مصرف انرژی فسیلی بر کاهش کیفیت محیط‌زیست تأیید شده و بین رشد اقتصادی و انتشار آلاینده‌ها رابطه U شکل مشاهده شده است.

هیماوان و همکاران^۱ (۲۰۲۴) در مقاله‌ای با عنوان (پیش‌بینی موقعیت تولید سرانه GDP با استفاده از داده‌های انرژی) به پیش‌بینی موقعیت تولید سرانه GDP کشورها با استفاده از داده‌های مصرف و تولید برق و رویکرد یادگیری ماشین پرداخته‌اند. آن‌ها GDP سرانه کشورهای مختلف را به دسته‌های مختلف تقسیم کرده و توانستند با دقت بالای ۸۰ درصد، موقعیت GDP سرانه کشورها را در ۱۰ دسته مختلف پیش‌بینی کنند. این مطالعه نشان داد که مصرف برق، به‌ویژه در بخش صنعتی، ارتباط قوی با وضعیت اقتصادی کشورها دارد و می‌تواند ابزاری مؤثر برای تولید و سرمایه‌گذاری باشد.

ایاد و همکاران^۲ (۲۰۲۳) در مقاله‌ای با عنوان (تأثیرات سرریز ناشی از عدم قطعیت و جهانی‌شدن بر کیفیت محیط زیست در هند: شواهدی از آزمون هم‌انباشتگی ترکیبی و مدل ARDL تقویت‌شده) با استفاده از داده‌های سال ۱۹۷۰-۲۰۲۰ و نیز مدل ARDL توسعه‌یافته و آزمون‌های هم‌جمعی، نقش عدم قطعیت اقتصادی و جهانی‌شدن را بر کیفیت محیط‌زیست و انتشار CO₂ بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که افزایش جهانی‌شدن ممکن است در کوتاه‌مدت تأثیر منفی بر کیفیت محیط زیست داشته باشد، اما در بلندمدت می‌تواند از طریق انتقال فناوری و استانداردهای زیست‌محیطی، تأثیر مثبت ایجاد کند. هم‌چنین، عدم قطعیت اقتصادی و سیاسی تأثیر منفی بر کیفیت محیط زیست دارد، چرا که نوسانات در سیاست‌ها و اقتصاد می‌توانند منجر به کاهش سرمایه‌گذاری در پروژه‌های زیست‌محیطی و کاهش نظارت بر تخریب محیط‌زیست شوند. رحمان و همکاران^۳ (۲۰۲۳) در مقاله‌ای با عنوان (بررسی رابطه پویای میان انتشار دی‌اکسید کربن، مصرف انرژی و رشد اقتصادی: شواهدی از چین) با بررسی داده‌های بلندمدت چین از سال ۱۹۷۱-۲۰۱۴، مدل ARDL را برای تحلیل پویای روابط بین انرژی، CO₂ و رشد اقتصادی به کار برده‌اند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که مصرف انرژی، رشد اقتصادی و تولید ناخالص داخلی در تحلیل بلندمدت دارای ضریب‌های مثبت هستند و مقادیر احتمال مربوط به آن‌ها به ترتیب (۰.۰۶۲)، (۰.۰۰۰) و

¹ Himawan et al.

² Ayad et al.

³ Rehman et al.

(۰.۱۰۰) می‌باشد که اعتبار ارتباط معنادار آن‌ها با انتشار CO_2 را تأیید می‌کند. همچنین، نتایج تحلیل کوتاه‌مدت نیز نشان می‌دهد که مصرف انرژی، رشد اقتصادی و تولید ناخالص داخلی در کوتاه‌مدت نیز ارتباط معناداری با انتشار CO_2 در چین دارند. نورگازینا و همکاران^۱ (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با عنوان (بازآزمایی تأثیرات بر انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) در چین: شواهدی از رویکرد ARDL پویا) با استفاده از داده‌های سالیانه از ۱۹۷۹-۲۰۱۹ و نیز مدل ARDL پویا، نقش رشد اقتصادی و مصرف انرژی را بر انتشار CO_2 چین تحلیل کرده و به تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت با توجه به داده‌های پویای زمانی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که مصرف انرژی نقش مهمی در افزایش انتشار CO_2 دارد، به ویژه مصرف انرژی از منابع غیرقابل تجدید که بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و به افزایش و کاهش تولید کمک می‌کنند. عباسی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در مقاله‌ای با عنوان (مصرف انرژی، رشد صنعتی، شهرنشینی و انتشار گاز CO_2 چه تأثیری بر رشد اقتصادی پاکستان دارند؟ رویکردی نوین با استفاده از شبیه‌سازی‌های پویای مدل ARDL) با استفاده از مدل شبیه‌سازی ARDL پویا (dynamic ARDL simulations)، اثرات مثبت و منفی متغیرهای صنعتی و انتشار CO_2 بر رشد اقتصادی در پاکستان را در دوره ۱۹۷۲-۲۰۱۸ بررسی کرده‌اند. این روش امکان تحلیل پویای روابط کوتاه‌مدت و بلندمدت بین متغیرها را با دقت بیشتری فراهم می‌سازد و سناریوهای مختلف سیاست‌گذاری را از طریق شبیه‌سازی واکنش‌های متغیر وابسته به شوک‌های متغیرهای مستقل نشان می‌دهد. نتایج تجربی آن‌ها نشان می‌دهند که مصرف انرژی و رشد صنعتی تأثیر مثبت و معناداری بر رشد اقتصادی دارند، در حالی که انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2) در بلندمدت می‌تواند اثر منفی بر اقتصاد داشته باشد. همچنین، شهرنشینی در کوتاه‌مدت رشد اقتصادی را تحریک می‌کند، اما در بلندمدت تأثیر آن به سیاست‌های مدیریت شهری بستگی دارد. یافته‌ها اهمیت اتخاذ سیاست‌های پایدار در حوزه انرژی و محیط‌زیست را برای رشد اقتصادی پایدار در پاکستان نشان می‌دهند. ادگبسان و ارجوب^۳ (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان (رابطه میان رشد اقتصادی، مصرف انرژی، انتشار CO_2 و شهرنشینی: شواهدی از کشورهای MINT) با استفاده از مدل ARDL و داده‌های سالیانه ۱۹۹۳-۲۰۱۷ و نیز انجام آزمون هم‌جمعی، رابطه بلندمدت

¹ Nurgazina et al.

² Abbasi et al.

³ Odugbesan & Rjoub

و کوتاه مدت میان مصرف انرژی، انتشار CO₂ و رشد اقتصادی را در کشورهای MINT بررسی کرده و به اهمیت ملاحظات پویایی و عدم قطعیت در مدل سازی اشاره کرده اند. رشد اقتصادی در کشورهای MINT به طور معناداری با مصرف انرژی همبستگی دارد؛ به این معنا که افزایش تولید ناخالص داخلی (GDP) منجر به افزایش مصرف انرژی می شود. هم-چنین، مصرف بیشتر انرژی رابطه ای مثبت با افزایش انتشار CO₂ دارد؛ بنابراین توسعه اقتصادی بدون توجه به نوع انرژی مصرفی می تواند به تخریب محیط زیست بینجامد. انوار و کری (۲۰۱۵) در مقاله ای با عنوان (جریان های مالی و درآمد سرانه در کشورهای در حال توسعه) با استفاده از داده های تابلویی در دوره ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۱، اثر سه نوع جریان مالی شامل سرمایه گذاری مستقیم خارجی، وجوه ارسالی و کمک های رسمی توسعه را بر درآمد سرانه در کشورهای با درآمد پایین و متوسط بررسی کردند. نتایج نشان داد که کمک های رسمی توسعه به طور مستقیم اثر منفی بر تولید سرانه دارد، اما در صورت کارایی هزینه های دولتی می تواند به صورت غیرمستقیم اثر مثبت داشته باشد. در مقابل، سرمایه گذاری مستقیم خارجی و وجوه ارسالی هر دو تأثیر مستقیم و معنادار مثبتی بر درآمد سرانه دارند.

ذبیحی و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله ای با عنوان (بررسی آثار آستانه ای ساختار مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی سرانه بر انتشار کربن در محیط زیست: رهیافت رگرسیون انتقال ملایم پانلی) با بررسی مجموعه ای از ۳۷ کشور طی دوره زمانی ۲۰۰۲ - ۲۰۱۹ به آثار آستانه ای متغیرهای ساختار مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی سرانه بر انتشار کربن با استفاده از رویکرد غیر خطی الگوهای رگرسیونی انتقال ملایم پانلی می پردازند. نتایج مربوطه وجود رابطه غیر خطی میان متغیرهای هر دو الگو را تایید می کنند و نشان می دهند که تولید ناخالص داخلی سرانه در حالت آستانه ای ساختار مصرف انرژی و ساختار مصرف انرژی در حالت آستانه ای تولید ناخالص داخلی دارای اثری مثبت بر انتشار کربن می باشد. همچنین شهرنشینی و باز بودن تجاری نیز در هر دو مدل دارای اثر مثبت بر انتشار کربن می باشد. مرادی و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله ای با عنوان (تأثیر رشد تسهیلات بانکی بر رشد اقتصادی و سرمایه گذاری در ایران) به بررسی ارتباط بین رشد مانده تسهیلات بانکی، رشد ارزش افزوده و سرمایه گذاری پرداختند. آن ها نشان دادند که شوک در تغییرات رشد مانده تسهیلات بانکی موجب افزایش رشد ارزش افزوده تولید می شود. خادم علیزاده (۱۳۹۲) در مقاله ای با عنوان (تأثیر بازار سرمایه بر رشد اقتصادی در ایران (۱۳۹۰-۱۳۷۰) با استفاده از

¹ Anwar and Cooray

رویکرد تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) اثر بازار سرمایه بر رشد اقتصادی در ایران طی دوره (۱۳۹۰-۱۳۷۰)، مورد بررسی قرار داده است. او با انجام رگرسیون روی مدل رشد انتخابی، رابطه شاخص بازار سرمایه با رشد اقتصادی در ایران را برآورد کرد. یافته‌های پژوهش نشان داد که رابطه مثبت و معناداری بین شاخص‌های بازار سرمایه و رشد اقتصادی در ایران وجود دارد. در واقع، سرمایه ناخالص بر رشد تولید و به عبارت بهتر رشد اقتصادی تأثیر مثبت و معنادار دارد. صادقی و همکاران (۱۳۹۱) در مقاله‌ای با عنوان (رابطه علی بین مصرف انرژی و تولید در بخش صنعت در ایران) به بررسی رابطه بین مصرف انرژی و ارزش تولیدات زیر بخش‌های صنعتی در صنایع کشور ایران طی دوره ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۶ با استفاده از علیت گرنجر و گرنجر هشیانو پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک رابطه علی یک طرفه بین متغیرهای ارزش تولیدات صنعتی و انرژی مصرفی، از سوی انرژی مصرفی به ارزش تولیدات زیر بخش‌های صنعتی بر اساس طبقه بندی ISIC برقرار است و مصرف انرژی از عوامل تعیین کننده ارزش تولیدات صنایع ایران می باشد. همچنین، افزایش مصرف انرژی می تواند بهبود تولیدات بخش صنعت کمک کند. دیلمی نژاد و استادحسین (۱۳۸۹)، در مقاله‌ای با عنوان (بررسی رابطه بین مصرف انرژی و ارزش افزوده بخش‌های منتخب اقتصادی در ایران (۱۳۴۶-۱۳۸۴)) با بررسی رابطه علیت بین مصرف کل انرژی و ارزش افزوده بخش‌های منتخب اقتصادی ایران طی دوره ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۴ با استفاده از آزمون علیت گرنجر، به تحلیل ارتباط متقابل این دو متغیر می پردازند. بخش‌های مورد بررسی شامل صنعت، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و حمل و نقل است. نتایج آن‌ها نشان می دهد که در مواردی که رابطه علیت یک طرفه از مصرف انرژی به ارزش افزوده برقرار است، افزایش مصرف انرژی عامل محرک ارزش افزوده محسوب می شود و لذا باید در سیاست‌های صرفه جویی انرژی با احتیاط کامل عمل شود. همچنین در شرایطی که رابطه علیت از ارزش افزوده به سمت مصرف انرژی است، می توان سیاست‌های صرفه جویی را بدون در نظر گرفتن روند ارزش افزوده به اجرا گذاشت. این مطالعه اهمیت بررسی دقیق رابطه مصرف انرژی و ارزش افزوده را برای برنامه ریزی و تدوین سیاست‌های بخش انرژی در ایران برجسته می کند. تقوی و محمدی (۱۳۸۵) در مقاله‌ای با عنوان (تأثیر سرمایه انسانی بر رشد اقتصادی در ایران) با استفاده از آمارهای مربوط به دوره ۱۳۸۱-۱۳۳۸ و نیز مدل رشد درون زا و استفاده از روش حداقل مربعات معمولی به بررسی تأثیر رشد شاخص‌های معرف سرمایه انسانی بر رشد

اقتصادی در ایران پرداختند و نشان دادند که رشد سطح سواد در بزرگسالان و نیز رشد متوسط سالهای تحصیل نیروی کار، تأثیر مثبت و معناداری روی رشد تولید ناخالص داخلی دارد. بنابراین، تحقق توسعه اقتصادی نیازمند توجه جدی به مقوله سرمایه انسانی و تلاش در جهت بهبود شاخص‌های مرتبط با آن است تا رشد تولید صورت گیرد. فرهادی (۱۳۸۳) در مقاله‌ای با عنوان (بررسی آثار تجارت خارجی بر رشد اقتصادی ایران) به بررسی آثار تجارت خارجی بر رشد اقتصادی ایران می‌پردازد. نتایج حاصل از برآورد الگو با استفاده از روش ARDL برای دوره ۱۳۴۵ تا ۱۳۸۰ بیانگر آن است که تجارت بین‌الملل، به عنوان شاخص "درجه باز بودن اقتصاد"، تأثیر مثبتی بر رشد سرانه تولید ناخالص داخلی ایران دارد. او نشان می‌دهد که سهم ایران در صادرات و واردات نسبت به جهان اندک بوده و در ترکیب واردات، اتکای بیش از حد به کالاهای واسطه‌ای و سرمایه‌ای طی یک دوره بلندمدت وجود داشته است. همچنین تمرکز صادرات کشور و سهم بالای نفت در صادرات کالایی، عدم تنوع کافی و توسعه نیافتگی ساختار تولید ملی را نشان می‌دهد که این موضوع موجب شکنندگی و آسیب‌پذیری تجارت در اقتصاد کشور شده است. اغلب این مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های پویای ARDL با افزودن فاکتورهای عدم قطعیت و آزمون‌های هم‌جمعی، توان تحلیل دقیق‌تری را فراهم می‌کنند. همچنین، مصرف انرژی و رشد صنعتی معمولاً تأثیر مثبت بر رشد اقتصادی دارند، اما انتشار CO_2 اغلب اثر منفی‌تری در بلندمدت دارد. نوآوری اصلی مطالعه حاضر بهره‌گیری از مدل فازی است که برخلاف روش‌های کلاسیک مانند ARDL و VAR، روابط میان متغیرها را به صورت درجه‌ای و نه قطعی مدل‌سازی می‌کند و بنابراین می‌تواند عدم قطعیت و مبهم بودن داده‌های اقتصادی را بهتر لحاظ کند. مدل‌های کلاسیک مانند ARDL صرفاً روابط بلندمدت میان متغیرها را تحلیل می‌کنند و VAR سیستم‌های چندمتغیره را مدل‌سازی می‌کند، اما هر دو در شرایط داده‌های غیرقطعی محدودیت دارند (شهباز و همکاران، ۲۰۱۵؛ ایاد و همکاران، ۲۰۲۳؛ ارن و بایتس،^۱ ۲۰۲۵). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که مدل‌های فازی در پیش‌بینی و تحلیل داده‌های اقتصادی با عدم قطعیت، دقت بالاتری دارند؛ برای مثال، ژوان (۲۰۲۵) در بررسی اقتصاد ویتنام و زو و همکاران (۲۰۲۵) در تحلیل کشورهای نوظهور، اهمیت مدل‌های فازی در تحلیل‌های مرتبط با انتشار CO_2 و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر را تأکید کرده‌اند. بنابراین، استفاده از مدل فازی می‌تواند مزیت قابل توجهی نسبت به مدل‌های کلاسیک ارائه دهد، به

¹ Eren & Baets

شرط آنکه مقایسه مستقیم و کمی با این مدل‌ها صورت گیرد. مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های بانک مرکزی و ترازنامه انرژی ایران در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰، تأثیر مصرف انرژی بخش صنعت، جمعیت، نیروی کار، سرمایه، انتشار CO_2 و بازبودن تجارت بر تولید ناخالص داخلی سرانه را تحت شرایط عدم قطعیت فازی تخمین می‌زند و با ارائه مقایسه تطبیقی با سایر اقتصادهای مشابه، چارچوب نظری و مرجع روش‌شناسی مدل‌های ARDL، DYNARDL و OLS را تقویت کرده و اعتبار یافته‌ها را افزایش می‌دهد. این مطالعه به‌طور همزمان نوآوری روش‌شناختی و کاربردی دارد و قادر است اثرات عدم قطعیت متغیرهای اقتصادی و زیست‌محیطی را بر رشد اقتصادی به‌صورت دقیق تحلیل کند، چیزی که مدل‌های کلاسیک به دلیل محدودیت در مواجهه با داده‌های غیرقطعی قادر به انجام آن نیستند.

مبانی نظری

رابطه میان رشد اقتصادی، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها یکی از مباحث محوری در اقتصاد انرژی و توسعه پایدار است. مبانی نظری این رابطه بر فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس (EKC)، نظریه رشد نئوکلاسیک سولو و الگوی حسابداری رشد استوار است. در چارچوب نظریه سولو، تولید ناخالص داخلی سرانه تابعی از نیروی کار، سرمایه و بهره‌وری کل عوامل است، اما در تحلیل‌های نوین انرژی، مصرف انرژی به‌عنوان نهاده‌ای مکمل سرمایه و نیروی کار در تولید لحاظ می‌شود (انیانو و کور، ۲۰۲۴^۱). از سوی دیگر، طبق فرضیه EKC، در مراحل اولیه توسعه اقتصادی، افزایش تولید منجر به رشد انتشار CO_2 می‌شود، اما در سطوح بالاتر درآمد، با بهبود فناوری و افزایش بهره‌وری انرژی، انتشار آلاینده‌ها کاهش می‌یابد (فرر-گانزالز و همکاران ۲۰۲۴^۲). این دیدگاه نظری، زمینه‌ساز تحلیل پویای اثرات متغیرهایی همچون مصرف انرژی صنعتی، انتشار CO_2 ، موجودی سرمایه و نیروی کار بر تولید ناخالص داخلی سرانه در این پژوهش است. در همین راستا، پژوهش‌های جدید نیز نشان داده‌اند که نوآوری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند به کاهش انتشار آلاینده‌ها در بلندمدت کمک کنند و از شدت انرژی در بخش صنعت بکاهند (ژوان، ۲۰۲۵).

¹ Anyanwu & Kur

² Freire-González et al.

از منظر اقتصاد زیست‌محیطی و نظریه‌های تجارت و باز بودن اقتصادی، درجه باز بودن تجاری می‌تواند از دو مسیر بر رشد اقتصادی و انتشار CO_2 تأثیر بگذارد: نخست، از طریق انتقال فناوری‌های پاک و افزایش کارایی انرژی که اثر کاهنده بر آلودگی دارد، و دوم، از طریق افزایش فعالیت صنعتی و مصرف انرژی فسیلی که انتشار را تشدید می‌کند (زو و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، جمعیت و نیروی کار از دیدگاه مدل‌های رشد درون‌زا، محرک‌های تقاضا و عرضه در اقتصاد محسوب می‌شوند که با تغییر در ساختار تولید، بر شدت مصرف انرژی و میزان انتشار کربن اثرگذارند. (لیانوس^۱، ۲۰۲۵). بنابراین، با اتکا به چارچوب‌های نظری یادشده و یافته‌های پژوهش‌های اخیر، در ادامه تأثیر متغیرهایی همچون مصرف انرژی، انتشار CO_2 ، موجودی سرمایه، نیروی کار، جمعیت و درجه باز بودن تجاری بر تولید ناخالص داخلی سرانه مورد سنجش و تحلیل قرار گیرد.

تأثیر مصرف انرژی بخش صنعت و انتشار دی اکسید کربن بخش صنعت بر تولید ناخالص داخلی

مصرف انرژی در بخش صنعت به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در رشد اقتصادی و تولید ناخالص داخلی شناخته می‌شود. در دنیای امروز، انرژی نه تنها به‌عنوان منبع اصلی تأمین نیازهای صنایع محسوب می‌شود، بلکه نقش بسیار مهمی در افزایش بهره‌وری و بهبود فرآیندهای تولید ایفا می‌کند. افزایش مصرف انرژی به‌طور مستقیم با رشد تولید و در نتیجه افزایش GDP ارتباط دارد. این مقاله به بررسی تأثیرات مصرف انرژی در بخش صنعت بر روی تولید ناخالص داخلی و همچنین ابعاد مختلف این رابطه می‌پردازد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که رابطه‌ای مثبت بین مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی وجود دارد. به عنوان مثال، مطالعات صورت گرفته در کشورهای در حال توسعه نشان می‌دهند که افزایش مصرف انرژی به ویژه در بخش صنعت، به افزایش تولید ناخالص داخلی منجر می‌شود. انرژی به‌عنوان منبع اصلی فعالیت‌های تولیدی، به صنایع کمک می‌کند تا ظرفیت تولید خود را افزایش دهند و در پاسخ به تقاضای بازار، محصولات بیشتری تولید کنند (سادورسکی^۲، ۲۰۱۰). علاوه بر این، صنایع با مصرف انرژی بیشتر، معمولاً توانایی سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های نوین و بهبود فرآیندهای تولید را دارند. این سرمایه‌گذاری‌ها می‌توانند به افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها منجر شوند که در نهایت تأثیر مثبتی بر روی تولید ناخالص

¹ Lianos

² Sadorsky

داخلی خواهد داشت. بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، کشورهایی که به بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع خود پرداخته‌اند، توانسته‌اند به رشد پایدار و افزایش GDP دست یابند. (چونتاناوات و همکاران، ۲۰۰۸)^۱. یکی از جنبه‌های مهم در تأثیر مصرف انرژی بر تولید ناخالص داخلی، بهینه‌سازی مصرف انرژی است. با توجه به افزایش هزینه‌های انرژی، صنایع به دنبال راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی هستند. بهینه‌سازی مصرف انرژی نه تنها می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید کمک کند، بلکه به افزایش رقابت‌پذیری صنایع نیز منجر می‌شود. به عنوان مثال، صنایع می‌توانند با پیاده‌سازی فناوری‌های جدید و بهبود فرآیندهای تولید، مصرف انرژی خود را کاهش دهند و در عوض، تولید خود را افزایش دهند (سورل، ۲۰۰۷)^۲. استفاده بهینه از انرژی در بخش صنعت همچنین تأثیرات مثبت زیست‌محیطی دارد. با کاهش مصرف انرژی، می‌توان از آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کاست. این مسئله نه تنها به بهبود وضعیت زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه به ایجاد محیط پایدارتر برای فعالیت‌های اقتصادی نیز منجر می‌شود. در نهایت، این بهبود در وضعیت محیط زیست می‌تواند به رشد اقتصادی و تولید ناخالص داخلی کمک کند، زیرا جوامع پایدارتر و سالم‌تر، معمولاً به رشد اقتصادی بیشتری دست می‌یابند. (سورل، ۲۰۰۷).

انتشار دی‌اکسید کربن (CO₂) به عنوان یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای، در سال‌های اخیر به موضوعی جدی در مباحث زیست‌محیطی و اقتصادی تبدیل شده است. بخش صنعت به عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار CO₂، نقش مهمی در تعیین وضعیت زیست‌محیطی و اقتصادی کشورها ایفا می‌کند. این مقاله به بررسی تأثیرات انتشار دی‌اکسید کربن در بخش صنعت بر تولید ناخالص داخلی (GDP) می‌پردازد و ابعاد مختلف این رابطه را تحلیل می‌کند. انتشار دی‌اکسید کربن در بخش صنعت معمولاً با فعالیت‌های تولیدی و اقتصادی مرتبط است. به طور کلی، افزایش تولید صنعتی منجر به افزایش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش انتشار CO₂ می‌شود. در بسیاری از کشورها، رشد تولید ناخالص داخلی به طور مستقیم به افزایش انتشار CO₂ مرتبط است. به عنوان مثال، مطالعات نشان می‌دهند که کشورهای در حال توسعه که به دنبال رشد اقتصادی سریع هستند، معمولاً با افزایش قابل توجهی در انتشار CO₂ مواجه‌اند (پیچوری و همکاران، ۲۰۱۳)^۳. از سوی دیگر، افزایش

¹ Chontanawat et al.

² Sorrell

³ Pachauri et al.

انتشار دی اکسید کربن می تواند تأثیرات منفی بر روی تولید ناخالص داخلی داشته باشد. این تأثیرات می تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم بروز کنند. تأثیرات مستقیم شامل هزینه های مرتبط با تغییرات اقلیمی، مانند خسارت های ناشی از بلایای طبیعی، کاهش کیفیت آب و هوا و افزایش هزینه های بهداشتی هستند. این مسائل می توانند به کاهش بهره وری و افزایش هزینه های تولید منجر شوند که در نهایت بر تولید ناخالص داخلی تأثیر می گذارد (استرن،^۱ ۲۰۰۷). انتشار دی اکسید کربن همچنین می تواند به کاهش کیفیت منابع طبیعی، مانند آب و خاک، منجر شود. این مسئله به نوبه خود می تواند بر روی تولیدات کشاورزی و صنعتی تأثیر منفی بگذارد. به عنوان مثال، تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش انتشار CO₂ می تواند باعث کاهش تولیدات کشاورزی شود که این امر به نوبه خود بر تأمین مواد اولیه صنایع غذایی و غذایی تأثیر خواهد گذاشت. این وضعیت می تواند به افزایش قیمت ها و کاهش دسترسی به مواد اولیه منجر شود و در نهایت بر تولید ناخالص داخلی اثرگذار باشد (IPCC, 2014). برای کاهش تأثیرات منفی انتشار دی اکسید کربن بر تولید ناخالص داخلی، کشورها نیاز به توسعه و اجرای سیاست های مؤثر در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه ای دارند. این سیاست ها می توانند شامل سرمایه گذاری در فناوری های پاک، افزایش بهره وری انرژی و ترویج انرژی های تجدیدپذیر باشند. به عنوان مثال، کشورهایی که به سرمایه گذاری در انرژی های پاک و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی پرداخته اند، توانسته اند علاوه بر کاهش انتشار CO₂، رشد اقتصادی پایدارتر و بهتری را تجربه کنند. (رن و همکاران،^۲ ۲۰۱۸).

تأثیر جمعیت و نیروی کار بر تولید ناخالص داخلی

تولید ناخالص داخلی به عنوان یکی از شاخص های کلیدی برای ارزیابی رشد اقتصادی یک کشور، تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد. دو عامل مهم و تأثیرگذار در این زمینه، جمعیت و نیروی کار هستند. جمعیت به عنوان منبع اصلی تولید، و نیروی کار به عنوان نیروی محرکه اقتصادی، نقش حیاتی در شکل گیری و رشد تولید ناخالص داخلی ایفا می کنند. جمعیت یکی از عوامل اساسی در تعیین ظرفیت تولید یک کشور است. افزایش جمعیت معمولاً به معنای افزایش تقاضا برای کالاها و خدمات است. این افزایش تقاضا می تواند به تحریک تولید و در نتیجه افزایش GDP منجر شود. به ویژه در کشورهای در حال توسعه، جمعیت

¹ Stern

² Ren et al.

جوان و رو به رشد می‌تواند به‌عنوان یک مزیت اقتصادی عمل کند، زیرا این جمعیت به نیروی کار و مصرف‌کننده‌ای تبدیل می‌شود که می‌تواند به رشد اقتصادی کمک کند. (بلوم و همکاران، ۲۰۰۳^۱). از سوی دیگر، جمعیت زیاد ممکن است به چالش‌هایی نیز منجر شود. اگر رشد جمعیت سریع‌تر از ظرفیت‌های اقتصادی باشد، می‌تواند منجر به بیکاری، نابرابری اجتماعی و فشار بر منابع طبیعی شود. این شرایط می‌تواند به کاهش کیفیت زندگی و در نتیجه کاهش تولید ناخالص داخلی منجر شود. به‌عنوان مثال، اگر زیرساخت‌های اقتصادی و اجتماعی نتوانند به‌سرعت به نیازهای جمعیت در حال افزایش پاسخ دهند، ممکن است تأثیر منفی بر روی رشد اقتصادی داشته باشند (منکیو و همکاران، ۱۹۹۲^۲). نیروی کار به‌عنوان عامل کلیدی در تولید و خدمات، تأثیر مستقیمی بر تولید ناخالص داخلی دارد. نیروی کار نه‌تنها به تولید کالا و خدمات کمک می‌کند، بلکه با افزایش بهره‌وری و نوآوری می‌تواند به افزایش GDP نیز منجر شود. به‌طور خاص، نیروی کار ماهر و با تجربه می‌تواند به بهبود کیفیت تولید و خدمات کمک کند و در نتیجه به رشد اقتصادی پایدار منجر شود (OECD, 2010). علاوه بر تعداد نیروی کار، کیفیت نیروی کار نیز اهمیت زیادی دارد. آموزش و پرورش، مهارت‌ها و توانایی‌های نیروی کار تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری و در نتیجه بر تولید ناخالص داخلی دارد. کشورهایی که به سرمایه‌گذاری در آموزش و توسعه مهارت‌های نیروی کار پرداخته‌اند، معمولاً شاهد رشد اقتصادی بالاتری بوده‌اند. به‌عنوان مثال، کشورهای اسکاندیناوی با سرمایه‌گذاری در آموزش و بهبود مهارت‌های نیروی کار، توانسته‌اند به یکی از بالاترین نرخ‌های تولید ناخالص داخلی در جهان دست یابند. (بارو و لی، ۲۰۱۳^۳). در حالی که جمعیت و نیروی کار می‌توانند به رشد تولید ناخالص داخلی کمک کنند، چالش‌هایی نیز وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، بیکاری است. بیکاری بالا می‌تواند تأثیر منفی بر رشد اقتصادی داشته باشد، زیرا نیروی کار به‌صورت مؤثر استفاده نمی‌شود. همچنین، اگر نیروی کار فاقد مهارت‌های لازم باشد، ممکن است نتواند به‌درستی به تولید کمک کند و در نتیجه تأثیر منفی بر GDP داشته باشد. از طرف دیگر، فرصت‌هایی نیز وجود دارد. به‌عنوان مثال، با توجه به تغییرات جمعیتی در بسیاری از کشورها، به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته، پیری جمعیت می‌تواند به افزایش نیاز به خدمات بهداشتی و مراقبتی

¹ Bloom et al.

² Mankiw et al.

³ Barro & Lee

منجر شود. این نیاز می‌تواند به توسعه بخش‌های جدید اقتصادی و ایجاد فرصت‌های شغلی جدید منجر شود. (ملل متحد،^۱ ۲۰۱۹).

بنابراین، در این پژوهش با تکیه بر نظریه‌های رشد درون‌زا، مدل‌های اقتصاد انرژی و مفاهیم اقتصاد فازی، تلاش شده است تا ضمن لحاظ کردن عدم قطعیت‌های آماری موجود در داده‌ها، برهم‌کنش پویای میان متغیرهای مذکور بررسی شود. بدین ترتیب، مدل نظری تحقیق بر پایه تعامل میان دسترسی به برق، توسعه مالی، سرمایه، کار، جمعیت، CO₂ و بازبودگی اقتصادی شکل گرفته و بنیان تحلیلی روشنی برای تبیین اثرات پویای این عوامل بر رشد اقتصادی بخش صنعت ایران فراهم می‌کند.

روش^۲ (مدل رگرسیون فازی)

مدل‌های رگرسیون فازی نخستین بار توسط تاناکا و همکاران^۳ در سال (۱۹۸۲) معرفی شدند. این مدل‌ها از طریق کمینه‌کردن میزان فازی بودن، بهترین معادله رگرسیون را به دست می‌دهند. این فرآیند از طریق کمینه‌سازی مجموع پهنای توابع عضویت ضرایب فازی معادله انجام می‌شود. مدل‌های رگرسیون فازی نسبت به مدل‌های رگرسیون کلاسیک ویژگی‌های خاص خود را دارند. رگرسیون کلاسیک برای معتبر بودن نتایج خود به مجموعه‌ای از فرضیات آماری قوی نیاز دارد. از جمله این فرضیات می‌توان به نرمال بودن خطاها، عدم وجود خودهمبستگی، و ثابت بودن واریانس خطاها اشاره کرد. نقض هر یک از این فرضیات می‌تواند اعتبار تحلیل‌های مبتنی بر رگرسیون کلاسیک را به شدت کاهش دهد. در بسیاری از موارد، توجیه این فرضیات دشوار است یا ممکن است شرایط لازم برای اعمال آن‌ها به درستی فراهم نباشد. به عنوان نمونه، ممکن است در مشاهدات یا تعاریف یک سیستم، اطلاعات ناکافی یا قضاوت‌های انسانی نادقیق تأثیرگذار باشد. اگرچه رگرسیون کلاسیک کاربردهای گسترده‌ای دارد، اما در شرایط زیر ممکن است نتایج گمراه‌کننده ارائه دهد: ۱- کمبود داده‌های مشاهده‌ای؛ ۲- عدم تبعیت خطاها از توزیع نرمال؛ ۳- ابهام در رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته؛ ۴- وجود عدم قطعیت در ارتباط با یک رویداد و ۵- نادرستی فرضیات خطی‌سازی. در شرایطی که استفاده از روش‌شناسی رگرسیون کلاسیک و توجیه فرضیات آن دشوار است، رگرسیون فازی می‌تواند ابزار مؤثرتری باشد. این روش با استفاده

¹ United Nations

² method

³ Tanaka, et al

از توابع عضویت و توزیع‌های امکانی، امکان مدل‌سازی شرایط نادقیق یا مبهم را فراهم می‌کند و به درک بهتر سیستم‌ها و ارائه نتایج دقیق‌تر کمک می‌نماید. در رگرسیون کلاسیک، برای هر مجموعه از متغیرهای ورودی، یک مقدار مشخص به عنوان خروجی محاسبه می‌شود. اما در رگرسیون فازی، بازه‌ای از مقادیر ممکن برای خروجی تخمین زده می‌شود که توزیع آن به صورت تابع عضویت تعریف می‌گردد.

به طور کلی، سه دسته اصلی از مدل‌های رگرسیون فازی وجود دارد:

مدل‌های رگرسیون فازی امکانی؛

مدل‌های رگرسیون کمترین مربعات؛

مدل‌های رگرسیون مبتنی بر تحلیل بازه‌ای.

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

$$\tilde{Y} = f(x, A) = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_1 + \tilde{A}_2 x_2 + \dots + \tilde{A}_n x_n \quad (1)$$

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

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

که در آن a مقدار نما، s^L و s^R به ترتیب پهنای چپ و پهنای راست $\tilde{A}$ هستند. در این رابطه اگر $s^L \neq s^R$ آن گاه عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ را نامتقارن گوئیم. در این حالت تابع عضویت $\tilde{A}$ را با توجه به سه مشخصه a, s^L, s^R به گونه ای دیگری نیز این تابع عضویت را نمایش داد. یعنی پهنای راست را بر حسب پهنای چپ بیان کرد. به این صورت که در تابع عضویت بالا قرار دهیم $s^R = k s^L$ که در آن k که عددی حقیقی و مثبت است. ضریب کشیدگی نامیده می شود. بنابراین عدد فازی مثلثی نامتقارن $\tilde{A}$ را میتوان با سه تایی $\tilde{A} = (a, s^L, k)_T$ نیز توصیف کرد در این حالت تابع عضویت $\tilde{A}$ به صورت زیر در می آید:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\tilde{Y}_j(\tilde{y}_j) \geq h, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (۶)$$

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

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

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

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

در حالتی که $\tilde{A}_i$ و $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ها را متقارن در نظر بگیریم. از قرار دادن رابطه (۴) در (۱۰) و (۵)، محدودیت ها به صورت رابطه (۱۳) و (۱۴) حاصل می شود:

$$(1-h)s_0 + (1-h) \sum_{i=1}^n (s_0 x_{ji}) - a_0 - \sum_{i=1}^n (s_0 x_{ji}) \geq -y_i, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (۹)$$

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

در رابطه اخیر منظور از x_{ji} مشاهده زام متغیر نام است. با توجه به توضیحات فوق پهنای راست و چپ برای درجه عضویت ۰/۹ محاسبه می شود.

یافته ها

تصریح مدل

داده های مورد استفاده در پژوهش، داده های سالانه از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ است و در مدل برآورد شده، متغیرهای مهم و تاثیرگذار بر تولید ناخالص داخلی سرانه ایران در نظر گرفته می شود. آمار مربوط به تولید ناخالص داخلی سرانه (gp) از بانک جهانی^۱، آمار مربوط به دسترسی به برق (ae)، توسعه مالی (fd)، جمعیت (pop)، نیروی کار (l)، موجودی سرمایه (cap)، انتشار CO_2 انتشار یافته بخش صنعت (co_2) و همچنین حاصل جمع صادرات و واردات تقسیم بر تولید ناخالص داخلی (باز بودن تجارت) (t) از آمارهای بانک جهانی و بانک مرکزی اخذ شده است. رحمان و همکاران (۲۰۲۳) برای چنین مدل هایی رابطه مصرف انرژی، رشد اقتصادی و تولید ناخالص داخلی با انتشار CO_2 بررسی کردند. عباسی و همکاران (۲۰۲۱) اثرات مثبت و منفی متغیرهای صنعتی و انتشار CO_2 بر رشد اقتصادی در پاکستان را در دوره ۱۹۷۲-۲۰۱۸ بررسی کرده اند. تقوی و محمدی (۱۳۸۵) به تأثیر سرمایه انسانی بر رشد اقتصادی در ایران و فرهادی (۱۳۸۳) به بررسی آثار تجارت خارجی بر رشد اقتصادی پرداخته است. فر-گانزالز و همکاران^۲ (۲۰۲۴) بر تأثیر انتشار CO_2 بر تولید سرانه تاکید دارند. بر مبنای این مطالعات، این متغیرها برای برآورد و بررسی انتخاب شدند. انوار و کری (۲۰۱۵) تأثیر توسعه مالی بر تولید برآورد کردند. هیمائو و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر دسترسی به برق بر تولید را نشان دادند. بعد از معرفی متغیرهای مدل، مدل به شرح زیر است:

$$gp = f(ae, fd, pop, l, cap, co_2, t)$$

نتایج

در ابتدا، آزمون ریشه واحد متغیرها صورت گرفت. در نهایت، بر اساس مدل رگرسیون فازی، وجود اثرگذاری این متغیرها طی افق زمانی بر تولید ناخالص داخلی سرانه بررسی شد. در جدول ۱، نتایج حاصل از آزمون ریشه واحد گزارش شده است.

¹ World bank

² Freire-González et al.

جدول ۱: نتایج آزمون ریشه واحد

متغیرها	احتمال	درجه مانایی	متغیرها	احتمال	درجه مانایی
<i>gp</i>	۰/۰۰۰۷	I(1)	<i>l</i>	۰/۰۱	I(1)
<i>ae</i>	۰/۰۰۰۱	I(1)	<i>cap</i>	۰/۰۰۰۳	I(0)
<i>fd</i>	۰/۰۰۰۲	I(1)	<i>co2</i>	۰/۰۰۰۱	I(1)
<i>pop</i>	۰/۰۱	I(1)	<i>t</i>	۰/۰۰۰۰	I(0)

منبع: محاسبات تحقیق حاضر

در ادامه، در این بخش ضرایب فازی مربوط به روابط ۱۲ که به صورت $(a_i \cdot s_i)(i = 1, 2, 3, \dots)$ می باشند، برآورد خواهند شد. که ان مقدار نما s^R, s^L به ترتیب پهنای چپ و پهنای راست $\tilde{A}$ را مشخص می کند، با استفاده از مدل رگرسیون فازی به بررسی تاثیر عدم قطعیت عوامل موثر بر تولید ناخالص داخلی سرانه پرداخته می شود. با توجه به دوره زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ تعداد مشاهدات ۳۰ سال است که تابع هدف با توجه به قیدها مینیمم می شود. لازم به ذکر است که تمام محاسبات در نرم افزار *MATLAB* انجام شده است. پس از تشکیل قیدها برای حل مسئله بهینه با ضریب فازی متقارن با توجه به درجه عضویت ۰/۹ مقادیر مرکز فازی پهنای راست و چپ فازی محاسبه شده است. همانطور که گفته شد یکی از ویژگی های رگرسیون فازی آن است که بر خلاف رگرسیون کلاسیک که یک ضریب برای همه متغیرها برآورد می کند در رگرسیون فازی بر هر متغیر یک ضریب تحت عنوان مرکز فازی برآورد می شود که نشان دهنده متوسط تاثیر گذاری ان متغیر بر متغیر وابسته است و یک پهنای فازی نیز برای هر متغیر برآورد می شود که می توان دو بخش پهنای راست و چپ را محاسبه کرد. در این بخش ضرایب فازی مربوط به روابط مربوطه در بخش روش-شناسی برآورد شده اند، که مقدار مرکز (پهنای متوسط) و پهنای فازی (پهنای راست و چپ) را مشخص می کند. گستره فازی نشان دهنده میزان فازی بودن عدد است. یعنی هر مقدار که این پارامتر بیشتر باشد، میزان فازی بودن عدد بیشتر است. به عبارت دیگر، رگرسیون فازی، بازه ای از مقادیر ممکن را برای همه متغیرها تخمین می زند، در حالی که رگرسیون کلاسیک

تنها یک مقدار مشخص را برای متغیرها محاسبه می‌کند. جدول ۱ نتایج رگرسیون فازی را در قالب پهنای راست، متوسط و چپ برای بررسی اثر متغیرهای توضیحی بر تولید ناخالص داخلی سرانه نشان می‌دهند. متغیرهای توضیحی شامل: دسترسی به برق، توسعه مالی، جمعیت، نیروی کار، موجودی سرمایه، CO_2 انتشار یافته بخش صنعت و همچنین حاصل جمع صادرات و واردات تقسیم بر تولید ناخالص داخلی هستند. جدول (۲) نتایج حاصل از برآورد رابطه مربوط در بخش روش‌شناسی را برای بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر تولید ناخالص داخلی سرانه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که C در جدول، عرض از مبدا مدل می‌باشد.

جدول ۲: برآورد کران‌های بالا، متوسط و پایین برای بررسی اثر متغیرهای مؤثر بر تولید ناخالص داخلی سرانه

درجه‌های عضویت	متغیرها	کران پایین	کران متوسط	کران بالا
درجه عضویت ۰/۱	c	-۲.۲۹e-۱۲	۱.۲۱e-۱۳	۲.۵۴e-۱۲
	cap	-۰.۱۰	۳.۹۶e-۱۵	۰.۱۰
	l	-۰.۰۰۸	۳.۲۲e-۱۵	۰.۰۰۸
	pop	-۳.۰۳e-۱۴	۶.۰۸e-۱۵	۴.۲۵e-۱۴
	t	۰.۵۲	۰.۵۵	۰.۵۸
	CO_2	-۰.۲۵	۲.۰۶۹e-۱۵	۰.۲۵
	ae	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	fd	-۰.۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۱
درجه عضویت ۰/۲	c	-۱.۲۷e-۱۱	۱.۱۶e-۱۲	۱.۵۰۶e-۱۱
	cap	-۰.۱۱	۳.۳۷e-۱۴	۰.۱۱
	l	-۰.۰۱	۲.۸۳e-۱۴	۰.۰۱

	<i>pop</i>	$-3.78e-13$	$6.27e-14$	$5.04e-13$
	<i>t</i>	۰.۵۲	۰.۵۵	۰.۵۹
	<i>co₂</i>	-۰.۲۸	$9.72e-15$	۰.۲۸
	<i>ae</i>	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	<i>fd</i>	-۰.۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۲
درجه عضویت ۰/۳	<i>c</i>	$-1.10e-13$	$1.71e-14$	$1.43e-13$
	<i>cap</i>	-۰.۱۳	$5.26e-16$	۰.۱۳
	<i>l</i>	-۰.۰۱	$4.28e-16$	۰.۰۱
	<i>pop</i>	$-5.38e-15$	$8.08e-16$	$7.004e-15$
	<i>t</i>	۰.۵۱	۰.۵۵	۰.۵۹
	<i>co₂</i>	-۰.۳۲	$2.74e-16$	۰.۳۲
	<i>ae</i>	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	<i>fd</i>	-۰.۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۲
	<i>c</i>	$-1.27e-10$	$2.23e-12$	$1.31e-10$
درجه عضویت ۰/۴	<i>cap</i>	-۰.۱۵	$7.27e-14$	۰.۱۵
	<i>l</i>	-۰.۰۱	$5.91e-14$	۰.۰۱
	<i>pop</i>	$-8.91e-13$	$1.11e-13$	$6.57e-12$
	<i>t</i>	۰.۵۱	۰.۵۵	۰.۶۰
	<i>co₂</i>	-۰.۳۸	$3.79e-14$	۰.۳۸
	<i>ae</i>	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	<i>fd</i>	-۰.۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۲

درجه عضویت ۰/۵	<i>c</i>	-۳.۲۹e-۱۲	۶.۶۶e-۱۴	۳.۴۲e-۱۲
	<i>cap</i>	-۰.۱۸	۲.۱۶e-۱۵	۰.۱۸
	<i>l</i>	-۰.۰۱	۱.۷۶e-۱۵	۰.۰۱
	<i>pop</i>	-۳.۲۵e-۱۴	۳.۳۲e-۱۵	۳.۹۱e-۱۴
	<i>t</i>	۰.۵۰	۰.۵۵	۰.۶۱
	<i>co₂</i>	-۰.۴۶	۱.۱۳e-۱۵	۰.۴۶
	<i>ae</i>	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	<i>fd</i>	-۰.۰۱	۰.۰۰۲	۰.۰۳
درجه عضویت ۰/۶	<i>c</i>	-۳.۴۵e-۱۲	۶.۱۳e-۱۴	۳.۵۷e-۱۲
	<i>cap</i>	-۰.۲۳	۱.۹۹e-۱۵	۰.۲۳
	<i>l</i>	-۰.۰۲	۱.۶۲e-۱۵	۰.۰۲
	<i>pop</i>	-۳.۸۱e-۱۴	۳.۰۶e-۱۵	۴.۴۳e-۱۴
	<i>t</i>	۰.۴۹	۰.۵۵	۰.۶۲
	<i>co₂</i>	-۰.۵۷	۱.۰۴e-۱۵	۰.۵۷
	<i>ae</i>	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	<i>fd</i>	-۰.۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۳
درجه عضویت ۰/۷	<i>c</i>	-۳.۹۸e-۱۳	۱.۵۱e-۱۴	۴.۲۹e-۱۳
	<i>cap</i>	-۰.۳۱	۴.۹۴e-۱۶	۰.۳۱
	<i>l</i>	-۰.۰۲	۴.۰۲e-۱۶	۰.۰۲
	<i>pop</i>	-۱.۲۸e-۱۴	۷.۵۹e-۱۶	۱.۴۳e-۱۴
	<i>t</i>	۰.۴۶	۰.۵۵	۰.۶۵

نام خانوادگی نویسنده اول و دوم (بیش از دو نویسنده نام خانوادگی نویسنده اول و همکاران | ۲۹

	CO_2	-۰.۷۶	$۲.۵۸e-۱۶$	۰.۷۶
	ae	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	fd	۰.۰۴	۰.۰۰۲	۰.۰۴
درجه عضویت ۰/۸	c	$-۳.۵۱e-۱۲$	$۱.۱۱e-۱۴$	$۳.۵۳e-۱۲$
	cap	-۰.۴۶	$۳.۶۴e-۱۶$	۰.۴۶
	l	-۰.۰۴	$۲.۹۶e-۱۶$	۰.۰۴
	pop	$-۱.۴۴e-۱۴$	$۵.۵۹e-۱۶$	$۱.۵۶e-۱۴$
	t	۰.۴۲	۰.۵۵	۰.۶۹
	CO_2	-۱.۱۵	$۱.۹۰۰۲e-۱۶$	۱.۱۵
	ae	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	fd	-۰.۰۶	۰.۰۰۲	۰.۰۷
	c	$-۷.۴۷e-۱۲$	$۱.۹۵e-۱۴$	$۷.۵۱e-۱۲$
	cap	-۰.۹۳	$۶.۴۷e-۱۶$	۰.۹۳
درجه عضویت ۰/۹	l	-۰.۰۸	$۵.۲۶e-۱۶$	۰.۰۸
	pop	$-۵.۲۳e-۱۴$	$۹.۹۱e-۱۶$	$۵.۴۳e-۱۴$
	t	۰.۲۸	۰.۵۵	۰.۸۳
	CO_2	-۲.۳۰۲	$۳.۴۲e-۱۶$	۲.۳۰۲
	ae	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴
	fd	-۰.۱۳	۰.۰۰۲	۰.۱۴

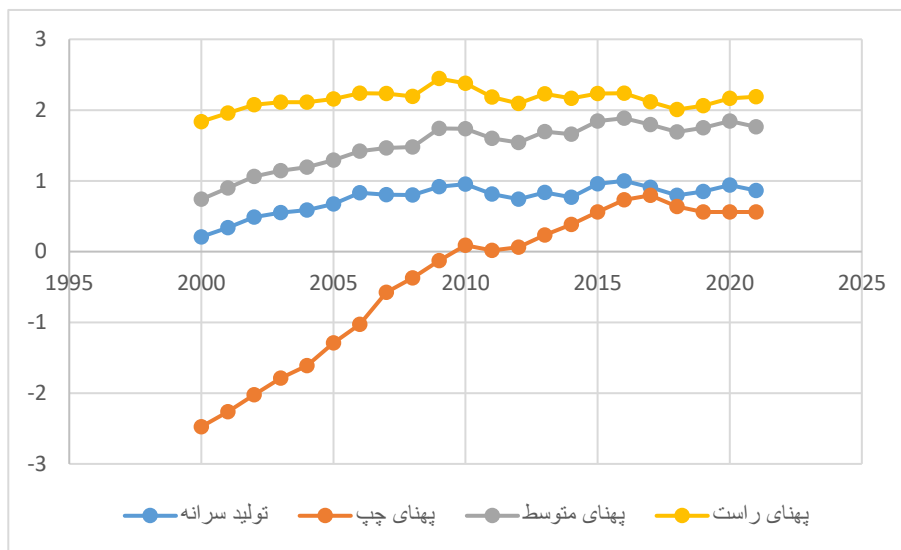
منبع: محاسبات تحقیق حاضر

همانطور که نتایج کران بالا در درجه عضویت ۰/۹ (افزایش عدم قطعیت) نشان می‌دهد از بین عوامل موثر بر تولید ناخالص داخلی سرانه، CO_2 انتشار یافته بخش صنعت، موجودی سرمایه، باز بودن تجارت به ترتیب با ضرایب ۲.۳۰۲، ۰.۹۳ و ۰.۸۳ بیشترین تاثیر را بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارند. در حالی که نتایج کران بالا در درجه عضویت ۰/۱ (کاهش عدم قطعیت) نشان می‌دهند که شدت تاثیر گذاری متغیرهای CO_2 انتشار یافته بخش صنعت، موجودی سرمایه، باز بودن تجارت به ترتیب با ضرایب ۰.۲۵، ۰.۱۰ و ۰.۵۸ بر تولید ناخالص داخلی سرانه نسبت به شرایط افزایش عدم قطعیت (درجه عضویت ۰/۹) کمترین تاثیر را بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارند. بنابراین شرایط عدم قطعیت از طریق متغیرهای CO_2 انتشار یافته بخش صنعت، موجودی سرمایه، باز بودن تجارت تاثیر قابل توجهی بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارد. همچنین، با افزایش عدم قطعیت، نیروی کار با ضریب ۰.۰۸ نقش کلیدی در تولید ناخالص داخلی سرانه دارد و از طریق افزایش بهره‌وری، به کارگیری مهارت‌ها و دانش تخصصی اثر مثبت بر تولید ایجاد می‌کند. نیروی کار آموزش دیده و انگیزه مند موجب بهبود کارآیی، کیفیت محصولات و ارزش افزوده شده و در نهایت رشد اقتصادی را تقویت می‌کند. موجودی سرمایه از طریق افزایش ظرفیت تولید و بهره‌برداری از فناوری‌های نوین، نقش کلیدی در ارتقای تولید سرانه و رشد اقتصادی ایفا می‌کند. به عبارت بهتر، زمانی که سرمایه گذاری در زیرساخت‌ها، ماشین آلات و ساختمان‌ها صورت می‌گیرد، موجودی سرمایه بیشتر می‌شود و باعث ایجاد اشتغال و بهره‌وری و تولید بیشتر می‌شود. موجودی سرمایه بستر لازم را برای تحول اقتصادی فراهم می‌کند. دی اکسید کربن منتشر شده در بخش صنعت، در صورت مدیریت مناسب و بهره‌برداری کنترل شده برای کاربردهای تولیدی، می‌تواند با افزایش کارایی منابع و تولید، به ارتقای تولید سرانه و تسریع رشد اقتصادی کمک کند، ضمن آنکه اثرات زیست محیطی نیز تحت کنترل قرار می‌گیرد. از طرفی نیز این متغیر باعث کاهش تولید با ضریب ۲.۳۰۲- شده که نیاز به سیاست هایی برای کاهش کربن می باشد. همچنین، درجه باز بودن تجارت ممکن است کشور را در معرض نوسانات اقتصادی و بحران‌های جهانی قرار دهد که می‌تواند عدم قطعیت‌هایی را در بخش تولید ایجاد کند. در نهایت، نیاز به سیاست‌های اقتصادی خاص برای حمایت از صنایع داخلی در کشورهای با درجه باز بودن تجارت بالا نیز می‌تواند به تاثیر گذاری بر تولید ناخالص داخلی سرانه کمک کند. در شرایط عدم قطعیت، دسترسی به برق و توسعه مالی می‌تواند تأثیرات مهمی بر رشد

و ثبات تولید داشته باشند. فراهم شدن دسترسی به برق با ضریب ۰.۳۴ می‌تواند موجب افزایش کارایی واحدهای تولیدی شود، چرا که بسیاری از فرآیندهای صنعتی و کشاورزی به انرژی برق نیاز دارند و دسترسی به این منبع می‌تواند سرعت تولید را افزایش دهد. همچنین، توسعه مالی با ضریب ۰.۱۴ می‌تواند زمینه‌ساز سرمایه‌گذاری‌های بیشتر در بخش‌های مختلف تولیدی باشد که این امر موجب ارتقای تکنولوژی‌ها و فرآیندهای تولیدی می‌شود و در نتیجه، حجم تولید و کیفیت کالاها را افزایش می‌دهد. در نهایت، دسترسی به برق و رشد مالی به صورت همزمان می‌توانند از نظر زیرساختی به ارتقای شبکه‌های تولید کمک کنند و با استفاده از فناوری‌های نوین، تولید را به سطحی پایدار و قابل پیش‌بینی رسانده و از نوسانات اقتصادی و تولیدی جلوگیری کنند.

در ادامه، به کمک شکل ۱ که برای درجه عضویت ۰/۹ ترسیم شده است به تجزیه و تحلیل پهنای راست، متوسط و چپ در مقایسه با روند واقعی تولید ناخالص داخلی سرانه در ایران برای سال‌های مورد بررسی پرداخته می‌شود. شکل ۱ برای درجه عضویت ۰/۹ و حاکی از افزایش عدم قطعیت در متغیرهای مذکور است. روند واقعی تولید ناخالص داخلی سرانه تقریباً منطبق بر پهنای چپ و متوسط است و پهنای راست فاصله زیادی با روند واقعی دارد که بیانگر آن است که در صورت داشتن برنامه و راهکارهای مناسب برای افزایش تولید و دسترسی به برق، توسعه مالی، جمعیت، نیروی کار، موجودی سرمایه، انتشار CO_2 بخش صنعت و درجه باز بودن اقتصادی، عدم قطعیت در متغیرهای مذکور می‌تواند میزان تولید در کشور را در حد پهنای راست افزایش دهد.

شکل ۱. بررسی تاثیر کاهش عدم قطعیت (درجه عضویت ۰/۹) در دسترسی به برق، توسعه مالی، جمعیت، نیروی کار، موجودی سرمایه، انتشار CO_2 بخش صنعت و درجه باز بودن اقتصادی بر پهنای راست، چپ، متوسط و تولید ناخالص داخلی سرانه در ایران



منبع: محاسبات تحقیق حاضر

بحث و نتیجه گیری

هدف پژوهش حاضر، بررسی عدم قطعیت و سایر عوامل موثر بر تولید ناخالص داخلی سرانه ایران است. برای این منظور، از روش خاص تجزیه و تحلیل مدل رگرسیون فازی با ضرایب متقارن که انعطاف پذیری بسیار زیادی در مدلسازی دارد، کمک گرفته شده است. همچنین، از مفاهیم مرکز، پهنای راست و چپ فازی که در ادبیات رگرسیون فازی مرسوم است، برای بررسی رفتار متغیرها استفاده شده است. این روش مدلسازی می تواند از منظر سیاست گذاری برای منابع ارزی کشور مفید باشد و سیاست های برنامه ریزان را جهت دهی کند. این پژوهش با استفاده از داده های سال های ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰ و رویکرد فازی، به تحلیل تاثیر عدم قطعیت در متغیرهایی چون دسترسی به برق، توسعه مالی، جمعیت، نیروی کار، موجودی سرمایه،

CO₂ انتشار یافته بخش صنعت و همچنین حاصل جمع صادرات و واردات تقسیم بر تولید ناخالص داخلی بر تولید ناخالص داخلی سرانه می‌پردازد. همان‌طور که بیان شد، در این مطالعه، مرکز، پهنای راست و چپ فازی که به ترتیب بیانگر به ترتیب بیانگر متوسط، بیشترین و کم‌ترین تاثیر متغیرها بر تولید ناخالص داخلی سرانه ایران است، برآورد شد.

نتایج رگرسیون فازی نشان داد دسترسی به برق تأثیر مثبت بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارد؛ به عبارتی، افزایش دسترسی به برق موجب تقویت ظرفیت تولید و رشد اقتصادی می‌شود، هرچند این اثر در چارچوب عدم قطعیت مدل فازی متغیر است و باید در سیاست‌گذاری‌های انرژی مدنظر قرار گیرد. همچنین، افزایش جمعیت تأثیر مثبت اما نسبتاً متغیری بر تولید سرانه دارد؛ به گونه‌ای که در صورت همراهی با سرمایه‌گذاری در آموزش و ارتقای نیروی کار، می‌تواند رشد اقتصادی را تقویت کند، در غیر این صورت ممکن است فشار بیشتری بر منابع وارد سازد. نتایج نشان داد نیروی کار تأثیر مثبت بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارد، اما در مدل رگرسیون فازی به دلیل عدم قطعیت‌های مربوط به کیفیت و بهره‌وری، میزان این اثر متغیر است. بنابراین، علاوه بر افزایش تعداد نیروی کار، ارتقای مهارت و کیفیت آن برای پایداری رشد اقتصادی ضروری است. همچنین، سرمایه‌فیزیکی نقشی کلیدی و مثبت در افزایش تولید سرانه دارد و نتایج مدل فازی این رابطه را تأیید می‌کند. نتایج نشان داد اگرچه سرمایه‌فیزیکی تأثیر مثبتی بر تولید سرانه دارد، اما درجه عدم قطعیت در مدل بیانگر اهمیت کارایی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری بهینه از آن است. بنابراین، سیاست‌گذاران باید علاوه بر افزایش حجم سرمایه، بر بهبود کارایی و استفاده مؤثر از آن تمرکز کنند. همچنین، انتشار CO₂ در بخش صنعت رابطه‌ای منفی، هرچند با عدم قطعیت فازی، با رشد اقتصادی دارد؛ به این معنا که رشد صنعتی همراه با افزایش آلودگی می‌تواند پایداری اقتصادی را تضعیف کند. بنابراین لازم است که رشد اقتصادی صنعتی با سیاست‌های کنترل انتشار آلودگی و فناوری‌های پاک همراه شود تا اثرات زیانبار کاهش یابد. تحلیل رگرسیون فازی نشان داد که باز بودن اقتصاد و افزایش نسبت تجارت خارجی به تولید ناخالص داخلی تأثیر مثبت و قابل توجهی بر تولید ناخالص داخلی سرانه دارد، هرچند با وجود عدم قطعیت، این اثر در برخی شرایط ممکن است متغیر باشد. این نتایج بیانگر اهمیت توسعه روابط تجاری بین‌المللی و بهبود فضای صادرات و واردات برای تحریک رشد اقتصادی است.

تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که نتایج ایران در بسیاری از جنبه‌ها با سایر اقتصادهای در حال توسعه مانند پاکستان، چین و هند همسو است، اما تفاوت‌هایی نیز مشاهده می‌شود. مشابه ایران، در این کشورها دسترسی به برق و سرمایه فیزیکی نقش زیادی در رشد اقتصادی دارند و کیفیت نیروی کار و بهره‌وری آن اهمیت بالایی دارد. با این حال، شدت اثر انتشار CO_2 در این کشورها اغلب کمتر یا با سیاست‌های کنترل محیط‌زیستی بهتر مدیریت شده است، در حالی که در ایران افزایش انتشار هنوز می‌تواند تهدیدی برای پایداری رشد باشد. همچنین، بازبودن تجارت و نسبت بالای تجارت خارجی به تولید ناخالص داخلی در چین و هند اثر مثبت قوی‌تری بر تولید سرانه داشته است، در حالی که در ایران، اثر آن تحت عدم قطعیت مدل فازی متغیر است، که نشان‌دهنده اهمیت تقویت روابط تجاری و سیاست‌های توسعه صادرات و واردات برای تحریک رشد اقتصادی پایدار است. این مقایسه تأکید می‌کند که تجربه کشورهای مشابه می‌تواند به سیاست‌گذاران ایران در مدیریت بهینه انرژی، سرمایه و محیط زیست و همچنین توسعه تجارت بین‌المللی کمک کند. در نهایت، باید گفت با توجه به اینکه نتایج نشان داد دسترسی به برق، سرمایه و نیروی کار رشد اقتصادی را تقویت می‌کنند، اما انتشار CO_2 اثر منفی دارد و باز بودن اقتصاد معمولاً مثبت است، پیامد سیاستی این است که افزایش انرژی و سرمایه باید با بهبود کارایی، مهارت نیروی کار، فناوری‌های پاک و توسعه تجارت خارجی همراه باشد. محدودیت مطالعه شامل تمرکز بر داده‌های تاریخی ایران است و تحقیقات آینده می‌توانند اثرات بخش‌های دیگر و سیاست‌های انرژی سبز را بررسی کنند.

تعارض منافع

تعارض منافع نداریم.

منابع

- تقوی، مهدی و محمدی، حسین. (۱۳۸۵). تأثیر سرمایه انسانی بر رشد اقتصادی در ایران. *پژوهشنامه اقتصادی*، ۶(۲۲)، ۴۳-۱۵.
- خادم‌علیزاده، امیر. (۱۳۹۲). تأثیر بازار سرمایه بر رشد اقتصادی در ایران (۱۳۷۰-۱۳۹۰) با استفاده از رویکرد تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA). *پژوهشنامه اقتصادی*، ۱۳(۵۰)، ۸۷-۱۲۱.
- دیلیمی‌نژاد رضا، استادحسین رضا. (۱۳۸۹) بررسی رابطه بین مصرف انرژی و ارزش افزوده بخش‌های منتخب اقتصادی در ایران. *فصلنامه پژوهش‌ها و سیاست‌های اقتصادی*؛ ۱۸ (۵۵): ۱۲۵-۱۴۰.
- ذبیحی، سیدمحمدقائم، کمالیان، رستا، اکبری، فاطمه و ناجی میدانی، علی اکبر. (۱۴۰۳). بررسی آثار آستانه‌ای ساختار مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی سرانه بر انتشار کربن در محیط زیست: رهیافت رگرسیون انتقال ملایم پانلی (PSTR). *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۱۳(۵۰)، ۴۸-۱۱.
- صادقی، سید کمال، صنوبر، ناصر، بهودی، داود. و دهقانی، علی. (۱۳۹۱). رابطه علی بین مصرف انرژی و تولید در بخش صنعت در ایران، *فصلنامه مدل‌سازی اقتصادی*، ۱(۱۷)، ۹۱-۱۱۰.
- فرهادی‌علیرضا. (۱۳۸۳). بررسی آثار تجارت خارجی بر رشد اقتصادی ایران، *فصلنامه پژوهشنامه اقتصاد و برنامه ریزی*، ۹(۱): ۵۸-۲۷.
- مرادی، ابراهیم، غفاری اسمعیلی، سیدمرتضی، و احمدی، آرش. (۱۳۹۷). تأثیر رشد تسهیلات بانکی بر رشد اقتصادی و سرمایه گذاری در ایران. *پژوهش‌های پولی بانکی*، ۱۱(۳۵)، ۲۴-۱.

References

- Abbasi, K. R., Shahbaz, M., Jiao, Z., & Tufail, M. (2021). How energy consumption, industrial growth, urbanization, and CO2 emissions affect economic growth in Pakistan? A novel dynamic ARDL simulations approach. *Energy*, 221, 119793.
- Anwar, S., & Cooray, A. (2015). Financial flows and per capita income in developing countries. *International Review of Economics & Finance*, 35, 304-314.
- Anyanwu, O. C., & Kur, K. K. (2024). Impact of Energy Consumption on Industrial Sector Performance. *Sage Open*, 14(4), 21582440241298856.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Energy consumption and growth in South America: Evidence from a panel error correction model. *Energy Economics*, 32(6), 1421-1426.
- Aslan, A., Ilhan, O., Usama, A. M., Savranlar, B., Polat, M. A., Metawa, N., & Raboshuk, A. (2024). Effect of economic policy uncertainty on CO2

with the discrimination of renewable and non-renewable energy consumption. *Energy*, 291, 130382.

Ayad, H., Mishra, P., Kumari, B., Ray, S., Nuță, F. M., Gautam, R., ... & Zamfir, C. G. (2023). The spillover effects of uncertainty and globalization on environmental quality in India: Evidence from combined cointegration test and augmented ARDL model. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1144201.

Barro, R. J. (1991). Economic growth in a cross section of countries. *The Quarterly Journal of Economics*, 106(2), 407-443.

Barro, R. J., & Lee, J. W. (2013). "A new data set of educational attainment in the world, 1950-2010." *Journal of Development Economics*, 104, 184-198.

Bloom, D. E., Canning, D., & Sevilla, J. (2003). "The demographic dividend: A new perspective on the economic consequences of population change." RAND Corporation.

Chontanawat, J., et al. (2008). "The relationship between energy consumption and economic growth in Thailand." *The Journal of Energy and Development*.

Deylami-Nejad, Reza, & Ostad-Hosseini, Reza. (2010). Investigating the relationship between energy consumption and value added of selected economic sectors in Iran. *Quarterly Journal of Economic Research and Policies*, 18(55), 125-140. [In Persian]

Eren, M., & Baets, B. D. (2025). Forecasting Turkey's Primary Energy Demand Based on Fuzzy Auto-regressive Distributed Lag Models with Symmetric and Non-symmetric Triangular Coefficients. *International Journal of Fuzzy Systems*, 27(1), 237-249.

Farhadi, Alireza. (2004). Investigating the effects of foreign trade on Iran's economic growth. *Quarterly Journal of Economic Research and Planning*, 9(1), 27-58. [In Persian]

Frankel, J. A., & Romer, D. (2017). Does trade cause growth? In *Global trade* (pp. 255-276). Routledge.

Freire-González, J., Padilla Rosa, E., & Raymond, J. L. (2024). World economies' progress in decoupling from CO2 emissions. *Scientific Reports*, 14(1), 20480.

Himawan, N., Saputri, H. A., & Sari, A. C. (2024). Prediction on gdp per capita position using energy data. *Procedia Computer Science*, 245, 1030-1039.

IEA (International Energy Agency). (2025). Global Energy Review 2025. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>

International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

International Energy Agency (IEA). (2025). Global Energy Review 2025. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>

IPCC (2014). "Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability." Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Jerry, M. M. (2019). Uncertain rule-based fuzzy systems: Introduction and New Directions.
- Khadem Alizadeh, Amir. (2013). The impact of capital market on economic growth in Iran (1991–2011) using the principal component analysis (PCA) approach. *Economic Research Journal*, 13(50), 87-121. [In Persian]
- Lianos, T. P. (2025). Population, environment and welfare: A difficult conversation. In *The Routledge Handbook of Global Sustainability Education and Thinking for the 21st Century* (pp. 116-130). Routledge India.
- Mankiw, N. G., Romer, D., & Weil, D. N. (1992). "A contribution to the empirics of economic growth." *The Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407-437.
- Mankiw, N. G., Romer, D., & Weil, D. N. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407-437.
- Mardani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., & Khoshnoudi, M. (2019). Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of the total environment*, 649, 31-49.
- Mardani, A., Streimikiene, D., Nilashi, M., Arias Aranda, D., Loganathan, N., & Jusoh, A. (2018). Energy consumption, economic growth, and CO₂ emissions in G20 countries: application of adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energies*, 11(10), 2771, 1-15.
- Nurgazina, Z., Guo, Q., Ali, U., Kartal, M. T., Ullah, A., & Khan, Z. A. (2022). Retesting the influences on CO₂ emissions in China: evidence from dynamic ARDL approach. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 868740.
- Odugbesan, J. A., & Rjoub, H. (2020). Relationship among economic growth, energy consumption, CO₂ emission, and urbanization: evidence from MINT countries. *Sage open*, 10(2), 2158244020914648.
- OECD (2010). "OECD Employment Outlook 2010." OECD Publishing.
- Pachauri, R. K., et al. (2013). "Climate Change 2013: The Physical Science Basis." Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Rehman, A., Ma, H., Ahmad, M., & Rauf, A. (2023). Investigating the dynamic association among CO₂ emission, energy use, and economic growth: Evidence from China. *SAGE Open*, 13(3), 21582440211060829, 1-15.
- Ren, X., et al. (2018). "Impact of energy consumption and carbon emissions on economic growth in China." *Energy Policy*.
- Sadeghi, Seyed Kamal, Sanobar, Naser, Behboudi, Davoud, & Dehghani, Ali. (2012). The causal relationship between energy consumption and production in the industrial sector in Iran. *Quarterly Journal of Economic Modeling*, 1(17), 91–110. [In Persian]
- Sadorsky, P. (2010). "The impact of renewable energy on economic growth: The case of the U.S. economy." *Energy Policy*.

- Shahbaz, M., Hye, Q. M. A., Tiwari, A. K., & Leitão, N. C. (2013). Economic growth, energy consumption, financial development, international trade and CO2 emissions in Indonesia. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 109-121.
- Shahbaz, M.; Solarin, S.A.; Sbia, R.; Bibi, S. (2015). Does energy intensity contribute to CO2 emissions? A trivariate analysis in selected African countries. *Ecol. Indic*, 50, 215-224.
- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Sorrell, S. (2007). "The contribution of energy efficiency to sustainable development." *Sustainable Development*.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439.
- Stern, N. (2007). "The Economics of Climate Change: The Stern Review." Cambridge University Press.
- Taghavi, Mehdi, & Mohammadi, Hossein. (2006). The impact of human capital on economic growth in Iran. *Economic Research Journal*, 6(22), 15-43. [In Persian]
- United Nations (2019). "World Population Prospects 2019." United Nations Department of Economic and Social Affairs.
- Xuan, V. N. (2025). The nexus between innovation, renewable energy consumption, foreign direct investment, GDP, and CO2 emissions in the context of Vietnam: New evidence from the ARDL approach. *Energy & Environment*, 0958305X251322893.
- Zabihi, Seyed Mohammad Ghaem, Kamelian, Rasta, Akbari, Fatemeh, & Naji Meydani, Ali Akbar. (2024). Investigating the threshold effects of energy consumption structure and per capita GDP on carbon emissions in the environment: A panel smooth transition regression (PSTR) approach. *Iranian Energy Economics Research Journal*, 13(50), 11-48. [In Persian]
- Zhou, R., Guan, S., & He, B. (2025). The Impact of Trade Openness on Carbon Emissions: Empirical Evidence from Emerging Countries. *Energies*, 18(3), 697.

ضمیمه ۱:

جدول ۱-۱ هم خطی متغیرهای مدل

متغیرها	AE	FD	POP	L	CAP	CO2	T	GP
AE	1	0.18	0.25	0.22	0.28	0.20	-0.15	0.24
FD	0.18	1	0.21	0.17	0.23	0.19	-0.10	0.20
POP	0.25	0.21	1	0.27	0.30	0.24	-0.18	0.26
L	0.22	0.17	0.27	1	0.29	0.23	-0.16	0.28
CAP	0.28	0.23	0.30	0.29	1	0.27	-0.14	0.22
CO2	0.20	0.19	0.24	0.23	0.27	1	-0.12	0.21
T	-0.15	-0.10	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	1	-0.13
GP	0.24	0.20	0.26	0.28	0.22	0.21	-0.13	1

منبع: محاسبات تحقیق حاضر



Name of Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

در این حالت، روابط بین متغیرها ضعیف هستند. یعنی تغییر یک متغیر تأثیر زیادی روی دیگری نمی گذارد. این الگو نشان می دهد که بین عوامل اقتصادی، جمعیتی و زیست محیطی ارتباط وجود دارد اما شدت آن کم است. همچنین متغیر t همچنان رابطه منفی اما ضعیف با بقیه دارد که نشان دهنده تأثیر کم و غیر مستقیم آن بر سایر متغیرها است.