University of Sistan and Baluchestan

Stable Economy Journal

Online ISSN: 2821 - 1049

Iranian Scientific Social Welfare Association

A Spatial Econometric Analysis of Carbon Dioxide Emissions in Selected Middle Eastern Countries

MaasoumehVali [1], Omid Ali Adeli[2]

1- Ph.D. Graduate in Economics, International Economics specialization, Department of Economics, Mofid University, Qom, Iran mandana.vali@yahoo.com

2- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Economics, University of Qom, Qom, Iran oa.adeli@qom.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 1 October 2025

Revised in revised form: 22April 2026

Accepted: 25April 2026

online: 6 May 2026

JEL: C33, Q43, Q54, Q53, O13.

Keywords:

Spatial econometrics, Carbon dioxide emissions, Environmental policy, Oil production.

ABSTRACT

This study investigates the spatial determinants of carbon dioxide (CO_2) emissions in selected Middle Eastern countries, emphasizing the significance of cross-border environmental externalities. Since CO_2 emissions are not confined within national boundaries, analyzing their spatial dynamics provides insights into the need for regional cooperation. The paper contributes to the environmental economics literature by applying advanced spatial econometric techniques to identify both direct and spillover effects of energy production, energy intensity, and electricity generation structure on CO_2 emissions in the region.This study employs a Spatial Error Panel Model with Fixed Effects with country- and time-fixed effects for eight Middle Eastern countries over the period 2000–2024. The model allows for the control of unobserved heterogeneity at both the country and time levels. Spatial interactions are captured through a spatial weight matrix reflecting geographical proximity and shared borders. The key explanatory variables include per capita oil production, per capita energy consumption, energy intensity, and the composition of electricity generation (fossil-, gas-, and oil-based sources). Furthermore, a series of diagnostic tests are conducted to assess the presence of spatial autocorrelation.The results indicate that CO_2 emissions exhibit a strong and significant spatial correlation (spatial autoregressive coefficient = 0.805), such that national emissions are substantially influenced by those of neighboring countries. Furthermore, per capita oil production has a positive and significant effect on CO_2 emissions, highlighting the environmental costs of resource dependence. In contrast, Per capita oil production has a positive and significant effect on CO_2 emissions, reflecting the role of energy efficiency and the restructuring of electricity production in reducing pollution. Primary energy intensity and fossil-based electricity consumption have positive effects as well, but they are not statistically significant.This study demonstrates that CO_2 emissions in the Middle East transcend national boundaries, rendering unilateral policies insufficient for their reduction. Effective mitigation requires the adoption of coordinated regional strategies that account for spatial interdependencies. The evidence underscores the necessity of reducing oil dependence, promoting cleaner technologies, and strengthening regional cooperation to control transboundary pollution and address climate change. Overall, the findings highlight the importance of incorporating spatial and economic interdependencies into environmental policymaking in resource-dependent regions.

Cite this article: Vali,. M., Adeli. O. A. (2026). C A Spatial Econometric Analysis of Carbon Dioxide Emissions in Selected Middle Eastern Countries *Stable Economy Journal*, 7 (1), 141-169. DOI: 10.22111/sedj.2026.53395.1634

© The Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/sedj.2026.53395.1634

Extended Abstract

Introduction

Climate change and the rapid growth of carbon dioxide (CO_2) emissions are among the most significant challenges of the twenty-first century, with profound environmental, economic, and social implications. Unlike local pollutants, CO_2 is a global pollutant with a transboundary nature; its environmental impacts extend beyond national borders, influencing the ecological and economic systems of neighboring countries. The Middle East represents a particularly critical case in this regard, as the region is heavily dependent on fossil fuel resources while simultaneously characterized by high levels of energy consumption and intensity. The combination of resource dependency and rapid economic development has made the region one of the hotspots of CO_2 emissions, with implications not only for local sustainability but also for global climate change efforts.

The existing literature in environmental economics has made substantial progress in exploring the determinants of CO_2 emissions, focusing on the role of energy use, resource dependency, trade, and technological development. However, much of the empirical evidence relies on traditional panel data models or cross-sectional regressions, which fail to capture spatial dependencies between countries. These conventional approaches implicitly assume independence across observational units, thereby ignoring the possibility that emissions in one country may influence, or be influenced by, emissions in geographically or economically proximate countries. This omission is particularly problematic in regions such as the Middle East, where economic interdependence, geographic proximity, and shared resource bases intensify cross-border spillovers.

Spatial econometric techniques provide an appropriate framework to address these methodological limitations. By explicitly accounting for spatial interdependencies, models such as the Spatial Error Panel Model with Fixed Effects allow researchers to identify both direct effects within countries and indirect (spillover) effects across borders. This approach has been increasingly applied in the context of environmental studies but remains underutilized in research on the Middle East, despite the region's importance in global energy markets.

Against this background, the present study investigates the spatial determinants of CO_2 emissions in Eight selected Middle Eastern countries over the period 2000–2024. The primary objective is to assess the role of per capita oil production, per capita energy consumption, energy intensity, and the structure of electricity generation in shaping emissions, while simultaneously identifying spatial spillovers among neighboring countries. By doing so, the study contributes to bridging a gap in the literature and provides empirical evidence to inform regional cooperation in mitigating climate change.

Method

The study employs a Spatial Error Panel Model with Fixed Effects (SE-FE) to account for unobserved spatially correlated shocks that affect CO_2 emissions across countries. Both country-fixed and time-fixed effects are included to control for time-invariant country characteristics and common temporal shocks. The dataset covers six Middle Eastern countries from 2002 to 2019, a period that coincides with significant fluctuations in oil markets, rising global attention to climate policy, and technological shifts in energy production.

The dependent variable is per capita CO_2 emissions, measured in metric tons. The explanatory variables include:

1. Per capita oil production, representing the resource dependence of the countries.
2. Per capita energy consumption, capturing the level of energy demand.
3. Energy intensity, defined as energy consumption relative to GDP, reflecting efficiency.
4. Electricity generation structure, disaggregated into fossil-based, gas-based, and oil-based electricity production.

To capture spatial dependence, a spatial weight matrix based on geographic proximity was constructed, where neighboring countries are assigned positive weights. This matrix allows the model to estimate the extent to which emissions in one country are influenced by emissions in adjacent states. The model was estimated using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) technique, which ensures consistent and efficient parameter estimates in spatial econometric models.

Results :

The empirical findings confirm the existence of strong and statistically significant spatial error dependence in CO_2 emissions across the countries. The estimated spatial error coefficient is 0.805, indicating that unobserved factors affecting emissions in one country are strongly correlated with those in neighboring countries. This highlights the importance of controlling for spatially correlated shocks when analyzing CO_2 emissions in the Middle East.

Regarding the explanatory factors, the results reveal several important insights:

- Per capita oil production has a positive and statistically significant effect on CO_2 emissions. This finding is consistent with the hypothesis that resource dependence exacerbates environmental degradation, as higher oil production not only increases domestic emissions but also fosters economic structures reliant on carbon-intensive sectors.
- Per capita energy consumption and energy intensity both exhibit negative and significant effects on emissions. This result is somewhat counterintuitive but can be explained by improvements in energy efficiency and structural shifts in energy consumption patterns. In particular, some countries in the region have implemented policies to enhance efficiency or

diversify their energy mix, leading to a reduction in carbon intensity despite high consumption levels.

- The structure of electricity generation plays a significant role. Fossil-based electricity is found to contribute positively to emissions, whereas gas-based and oil-based electricity appear to reduce emissions, although their coefficients are close to the threshold of statistical significance. These results suggest that gradual transitions in the energy mix may already be influencing emission trajectories, albeit modestly.

Overall, the findings confirm that emissions are not only driven by domestic factors but are also shaped by spatial dependencies across countries, thereby reinforcing the necessity of a regional perspective.

Conclusion:

This study provides robust empirical evidence that CO_2 emissions in the Middle East are influenced by both domestic factors and spatial error dependence from neighboring countries. The results demonstrate that unilateral national policies are insufficient to address the environmental challenges of the region. Instead, coordinated regional strategies and collective policymaking are essential.

From a theoretical perspective, the study emphasizes the importance of incorporating spatial and economic interdependencies into environmental analysis. By moving beyond the assumption of independence across units, spatial econometric approaches offer a more accurate understanding of the dynamics of pollution. The findings contribute to the literature on environmental economics by highlighting how spatial error dependence complicate national-level mitigation efforts.

From a policy perspective, the results highlight the need for Middle Eastern countries to reduce dependence on oil production, promote energy efficiency, and expand the deployment of clean energy technologies. Regional cooperation is indispensable, as transboundary externalities cannot be effectively managed through isolated policies. Institutions such as regional energy forums, climate agreements, and cross-border environmental initiatives should be strengthened to facilitate collective action.

Finally, the study also opens avenues for future research. One potential direction is to extend the analysis to a broader set of countries in the Middle East and North Africa (MENA) region, allowing for more comprehensive insights into spatial interdependencies. Another promising avenue is to integrate measures of trade, investment, and technological diffusion to better capture economic linkages that influence emissions. Additionally, further work could explore the role of renewable energy adoption and policy heterogeneity in shaping spatial emission patterns.

In conclusion, the study underscores that CO_2 emissions in the Middle East are not merely a national concern but a regional and global issue. Effective solutions require a shift from unilateral action to cooperative, multi-country strategies that recognize the spatial and economic interdependencies of environmental challenges.

اقتصاد باثبات
شاپا الکترونیکی: ۱۰۴۹-۲۸۲۱

تحلیل اقتصادسنجی فضایی انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای منتخب خاورمیانه

معصومه والی[۱]، امید علی عادلی[۲*]

۱- دانش آموخته مقطع دکتری رشته علوم اقتصادی گرایش بین الملل، گروه اقتصاد، دانشگاه مفید، قم، ایران mandana.vali@yahoo.com

۲- نویسنده مسئول:دانشیار، گروه اقتصاد، دانشگاه قم، قم، ایران oa.adeli@qom.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۹
تاریخ ویرایش:۱۴۰۵/۲/۸
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۵/۲/۱۰
تاریخ انتشار:۱۴۰۵/۲/۲۱

JEL : C33, Q43, Q54, Q53, O13.

واژه‌های کلیدی:

اقتصادسنجی فضایی، انتشار دی‌اکسید کربن، سیاست زیست‌محیطی، تولید نفت، تغییرات اقلیمی.

چکیده

این مطالعه به بررسی عوامل فضایی مؤثر بر انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) در کشورهای منتخب خاورمیانه می‌پردازد و بر اهمیت برون‌ریزهای زیست‌محیطی فرامرزی تأکید دارد. از آنجا که انتشار CO_2 محدود به مرزهای ملی نیست، تحلیل پویایی‌های فضایی آن می‌تواند ضرورت همکاری‌های منطقه‌ای را روشن سازد. این مقاله با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته اقتصادسنجی فضایی، آثار مستقیم و سرریز متغیرهایی همچون تولید نفت سرانه، شدت انرژی و ساختار تولید برق بر انتشار CO_2 در منطقه را شناسایی می‌نماید.

این پژوهش از مدل پانل خطای فضایی با اثرات ثابت[۱] با اثرات ثابت کشوری و زمانی برای هشت کشور منتخب خاورمیانه طی دوره ۲۰۲۴- ۲۰۰۰ استفاده می‌کند. مشخصات مدل، وابستگی فضایی را از طریق ماتریس وزن فضایی که نزدیکی جغرافیایی و مرزهای مشترک کشورها را بازتاب می‌دهد، لحاظ می‌کند. متغیرهای توضیحی کلیدی شامل تولید نفت سرانه، مصرف انرژی سرانه، شدت انرژی و ساختار تولید برق (شامل منابع فسیلی، گازی و نفتی) هستند. علاوه بر این، آزمون‌های تشخیصی برای بررسی وجود خودهمبستگی فضایی به کار رفته است. نتایج نشان می‌دهد که انتشار CO_2 دارای همبستگی فضایی قوی و معناداری است (ضریب خودرگرسیونی فضایی = ۰/۸۰۵)، به‌طوری‌که انتشار ملی به طور قابل توجهی از انتشار کشورهای همسایه تأثیر می‌پذیرد. همچنین، تولید نفت سرانه اثر مثبت و معناداری بر انتشار CO_2 دارد و هزینه‌های زیست‌محیطی وابستگی به منابع را برجسته می‌کند. در مقابل، تولید سرانه نفت اثر مثبت و معناداری بر انتشار CO_2 دارند که بیانگر نقش بهره‌وری انرژی و اصلاح ساختار تولید برق در کاهش آلایندگی است. شدت انرژی مصرفی اولیه و مصرف برق فسیلی تأثیر مثبت دارند ولی از نظر آماری در سطح قابل توجهی قرار ندارند.

این مطالعه نشان می‌دهد که انتشار CO_2 در خاورمیانه فراتر از مرزهای ملی است و سیاست‌های یکجانبه برای کاهش آن کافی نیستند. مقابله مؤثر مستلزم اتخاذ راهبردهای هماهنگ منطقه‌ای است که در آنها وابستگی‌های فضایی لحاظ شود. شواهد نشان می‌دهد کاهش وابستگی به نفت، ترویج فناوری‌های پاک‌تر و تقویت همکاری‌های منطقه‌ای برای کنترل آلودگی فرامرزی و مقابله با تغییرات اقلیمی ضروری است. به طور کلی، یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن وابستگی‌های فضایی و اقتصادی در تدوین سیاست‌های زیست‌محیطی در مناطق متکی به منابع تأکید می‌کند.

استناد: والی؛ معصومه ؛ عادلی، امید علی (۱۴۰۵)تحلیل اقتصادسنجی فضایی انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای منتخب خاورمیانه، *اقتصاد باثبات*، ۷ (۱)، ۱۴۱-۱۶۹.

DOI: 10.22111/sedj.2026.53395.1634

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

حق‌مؤلف © نویسندگان.

[1] Spatial Error Panel Model with Fixed Effects

۱. مقدمه

از سال ۱۹۸۰، دمای سطحی جهان هر دهه حدود ۰/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. دوره ۲۰۱۱–۲۰۲۰ گرم‌ترین دهه ثبت‌شده با دمای ۱/۰۹ درجه بالاتر از سطح پیشاصنعتی بود و سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۳ با دمای حدود ۱/۵ درجه بالاتر از سطح پیشاصنعتی، همه رکوردها را شکستند. (WMO، ۲۰۲۵). افزایش تاب‌آوری، سازگاری و مدیریت ریسک برای کاهش اثرات تغییر اقلیم ضروری بوده و با اهداف توسعه پایدار ۲۰۳۰ همسو است. این مسئله برای کشورهای در حال توسعه خاورمیانه که به دلیل محدودیت منابع، زیرساخت‌های ضعیف و آسیب‌پذیری‌های اجتماعی-اقتصادی، حساسیت بالایی به تغییر اقلیم دارند، حیاتی است.(*Ghasemifar et al، 2026*). اقتصادسنجی فضایی با مدل SDM به تحلیل دقیق انتشار CO_2 کمک می‌کند. در خاورمیانه، سرمایه‌گذاری در انرژی پاک تا ۲۰۳۰ سه برابر می‌شود. امارات (کاهش ٪۱۹ انتشار تا ۲۰۳۰ و صندوق ۳۰ میلیارد دلاری) و عربستان (هدف ۱۳۰ گیگاوات تجدیدپذیر) در مسیر تحول انرژی هستند (IEA، 2024). بر اساس داده‌های سال ۲۰۲۲، ایران با ۶۸۶ میلیون تن (سرانه ۷/۶۷ تن) بزرگترین انتشاردهنده CO_2 در میان هشت کشور منتخب خاورمیانه است. عربستان سعودی با ۶۰۸ میلیون تن و امارات متحده عربی با ۲۱۹ میلیون تن در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در میان کشورهای کوچکتر، قطر با ۳۵/۴۸ تن بالاترین انتشار سرانه را دارد؛ کویت (۲۳/۹۹ تن) و بحرین (۲۴/۷۵ تن) نیز انتشار سرانه بسیار بالایی دارند. عمان با ۹۱/۶ میلیون تن و سرانه ۱۹/۳۸ تن در جایگاه میانی است، در حالی که اردن با تنها ۲۳/۶ میلیون تن انتشار کل و سرانه ۲/۰۹ تن، پایین‌ترین میزان را در منطقه نشان می‌دهد. (*Worldometer،2022*). اقتصادسنجی فضایی با شناسایی الگوهای مکانی انتشار CO_2 و تحلیل اثرات سرایت فضایی (مانند تأثیر کاهش آلودگی یک استان بر استان‌های همجوار در ایران)، امکان طراحی سیاست‌های زیست‌محیطی فراملی را ممکن می‌سازد. این رویکرد با ورود عواملی مانند رشد اقتصادی به مدل‌های فضایی (از جمله مدل SDM)، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و ابزاری ارزشمند برای تحلیل عدالت محیطی و نابرابری‌های فضایی است. اقتصادسنجی فضایی با نگاه شبکه‌ای، به درک بهتر پویایی‌های منطقه‌ای و طراحی سیاست‌های هماهنگ کمک می‌کند؛ امری که برای ساکنان نواحی بیابانی متأثر از تغییرات اقلیمی حیاتی است (IPCC,2019). توسعه اقتصادی، مهمترین متغیر مؤثر بر آلودگی محیط زیست است. (قدمی دمآبی و همکاران، ۱۴۰۴) انتشار دی اکسید کربن و رشد اقتصادی در کشورهای نفتی عضو اوپک، مخارج درمانی را در کوتاه مدت و بلندمدت افزایش می‌دهد. (ورهرامی، ۱۴۰۴) همه‌گیری کووید- ۱۹، مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر را کاهش داده است. (عاقلی و همکاران، ۱۴۰۲) همچنین، تأثیر رشد اقتصادی بر مصرف انرژی به مراتب بیشتر از تأثیر توسعه مالی است. (فطرس و همکاران، ۱۳۹۹) خاورمیانه به دلیل اقلیم خشک، منابع آبی محدود و نبود زمین‌های

حاصلخیز با بحران شدید زیست‌محیطی مواجه است. کشف انرژی فسیلی موجب محدود ماندن سرمایه‌گذاری کشاورزی و وابستگی اقتصاد به تجارت و واردات مواد غذایی شد. *(OECD, 2018)* کشف منابع فسیلی در خاورمیانه، شدت مصرف انرژی را افزایش داده و پایین بودن هزینه سوخت‌های فسیلی همراه با تمرکز دولت‌ها بر رشد اقتصادی، مانع از اعمال سیاست‌های مؤثر کنترل آلودگی شده است.(*Enerdata,2021*) افزایش شدت انرژی در خاورمیانه نشان‌دهنده مصرف بالای انرژی برای رشد اقتصادی و تولید آلایندگی بیشتر است؛ به‌طوری که انتشار گازهای گلخانه‌ای این منطقه بین ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ حدود ۹۵ درصد افزایش یافته است. (*Rajabi Kouyakhi, 2022*). هدف اصلی این تحقیق، تحلیل ابعاد فضایی انتشار دی‌اکسید کربن و عوامل مؤثر بر آن در هشت کشور منتخب خاورمیانه (ایران، بحرین، اردن، قطر، کویت، عمان، عربستان سعودی و امارات متحده عربی) در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۴ با بهره‌گیری از مدل‌های اقتصادسنجی فضایی است. این مطالعه به دنبال درک وابستگی‌ها و سرریزهای مکانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، بررسی تأثیر مستقیم و غیرمستقیم متغیرهایی مانند شدت مصرف انرژی، تولید نفت و گاز و رشد اقتصادی بر میزان انتشار CO_2، ارائه بینش‌هایی کاربردی برای طراحی سیاست‌های زیست‌محیطی هماهنگ و یکپارچه، و افزایش دقت تحلیل‌ها با در نظر گرفتن اثرات فضایی می‌باشد. بر این اساس، سؤالات اصلی تحقیق عبارتند از: ۱) آیا همبستگی فضایی و اثرات سرریز مکانی معناداری در الگوهای انتشار CO_2 میان کشورهای منتخب خاورمیانه وجود دارد؟ ۲) عوامل اقتصادی و انرژی‌محور اصلی (مانند مصرف انرژی سرانه، تولید نفت سرانه، شدت انرژی، و نوع تولید برق) چه تأثیرات مستقیم و معناداری بر انتشار CO_2 در کشورهای مورد مطالعه دارند؟

فرضیات اصلی عبارتند از:

۱. فرضیه وابستگی فضایی: انتشار دی‌اکسید کربن در کشورهای خاورمیانه دارای وابستگی فضایی مثبت و معناداری است.

۲. فرضیه اثرات متغیرهای توضیحی به شرح ذیل است: الف) افزایش تولید سرانه نفت، منجر به افزایش معنادار انتشار CO_2 می‌شود، که ممکن است با پدیده "نفرین منابع" همراستا باشد. ب) افزایش مصرف انرژی سرانه، تأثیر معناداری بر کاهش انتشار CO_2 دارد که می‌تواند ناشی از بهبود بهره‌وری انرژی یا حرکت به سمت منابع انرژی پاک‌تر در کشورهایی با مصرف بالاتر باشد. ج) تولید برق از منابع فسیلی (غیر گازی و نفتی) تأثیر مثبت و نزدیکی به معناداری بر افزایش انتشار CO_2

دارد. د) تولید برق از منابع گازی و نفتی سرانه ممکن است با کاهش انتشار CO_2 مرتبط باشد. ذ) شدت انرژی مصرفی اولیه، با کاهش انتشار CO_2 مرتبط است.

۳. فرضیه پیامدهای سیاستی عبارتست از: رویکردهای صرفاً ملی برای کنترل انتشار CO_2 در خاورمیانه ناکافی هستند و برای مقابله مؤثر با این پدیده، همکاری‌های منطقه‌ای و سیاست‌گذاری‌های یکپارچه ضروری است.

۲. ادبیات موضوع و پیشینه تحقیق

بررسی انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای خاورمیانه نیازمند اتکا به چارچوب‌های نظری اقتصاد محیط‌زیست و اقتصاد منطقه‌ای است. بر اساس نظریه انتقال فناوری و نوآوری سبز، توسعه فناوری‌های پاک می‌تواند کارایی انرژی را افزایش دهد و شدت انتشار کربن را کاهش دهد، اما اثر این نوآوری‌ها به‌شدت به ساختار اقتصادی و منابع انرژی کشورهای مختلف وابسته است. (*Xu et al, 2021*) در خاورمیانه، وابستگی به منابع فسیلی انتشار CO_2 را تداوم می‌بخشد، اما سیاست‌های تنوع‌بخشی اقتصادی و سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند این اثر را تعدیل کند. از دیدگاه اقتصاد فضایی، انتشار کربن پدیده‌ای فرامرزی با سرریزهای ناشی از جریان کالاها، سرمایه و مصرف انرژی است؛ همجواری جغرافیایی می‌تواند هم به شکل‌گیری خوشه‌های آلاینده منجر شود و هم از طریق همکاری منطقه‌ای در نوآوری سبز، اثرات کاهنده داشته باشد. (*Lesage & Pace, 2008*) مدل‌های اقتصادسنجی فضایی به دلیل در نظر گرفتن تعاملات متقابل بین کشورها (و نه فقط ویژگی‌های داخلی)، برای بررسی انتشار CO_2 در خاورمیانه ضروری هستند. بر مبنای نظریه همگرایی زیست‌محیطی و فرضیه EKC، انتظار می‌رود با افزایش درآمد، کشورها ابتدا افزایش و سپس با پیشرفت فناوری و سیاست‌های زیست‌محیطی، کاهش انتشار را تجربه کنند. (*Xu et al, 2021*) اما در کشورهای خاورمیانه که ساختارهای اقتصادی نفت‌محور و تفاوت‌های نهادی گسترده وجود دارد، مسیر این همگرایی به شدت ناهمگون خواهد بود. از این‌رو، استفاده از مدل پانل فضایی به پژوهشگران اجازه می‌دهد ناهمگنی کشورها، سرریزهای فضایی و روندهای زمانی را به‌طور هم‌زمان بررسی کرده و تصویری دقیق‌تر از پویایی‌های انتشار دی‌اکسیدکربن در منطقه ارائه دهند.

۲-۱. مطالعات داخلی

خدادادی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل اقتصادسنجی فضایی، اثرات مستقیم و غیرمستقیم تغییر ساختار تولید در بخش صنعت بر انتشار دی‌اکسیدکربن در ۳۰ استان ایران طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد تولید ناخالص داخلی سرانه، شدت انرژی و جمعیت تأثیر مثبت و معناداری بر انتشار CO_2 دارند، در حالی که تغییر ساختار صنعتی اثر مستقیم منفی اما غیرمعناداری داشته است. نادری مایوان (۱۴۰۳) به بررسی تأثیر آلودگی هوا بر زیست‌پذیری شهر اراک پرداخت. داده‌ها از طریق اسناد، سازمان‌ها و پیمایش ۳۸۴ نفر جمع‌آوری شد و با استفاده از GIS و مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) تحلیل گردید. نتایج نشان داد شاخص‌های زیست‌پذیری اراک وضعیت مناسبی ندارند و به‌ویژه در محلات شرقی، جنوبی و جنوب‌غربی که به دلیل وجود صنایع بزرگ، ترافیک سنگین و بافت قدیمی آلوده‌تر هستند، شاخص‌های آلودگی هوا بیش از ۵۰ درصد بر زیست‌پذیری اقتصادی، کالبدی و زیست‌محیطی تأثیر گذاشته‌اند. عادلی و والی (۱۴۰۴) به تحلیل ارتباط میان شهرنشینی، گردشگری و انتشار کربن دی اکسید در استان‌های ایران با استفاده از مدل تصحیح خطای پانل پرداختند. نتایج حاصل از آزمون همجمعی رابطه بلندمدت میان سطوح شهرنشینی، شدت فعالیت‌های گردشگری و مصرف سوخت هر استان را تأیید نمود و اثرات شهرنشینی و گردشگری را بر انتشار دی اکسید کربن نشان می‌دهد. منصوری و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی تأثیر بهره‌وری و رشد اقتصادی بر انتشار دی اکسید کربن در ایران طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ با استفاده از رویکرد خود توضیحی با وقفه‌های توزیعی پرداختند. یافته‌ها نشان می‌دهد که در بلندمدت، اثرگذاری بهره‌وری انرژی بر انتشار دی اکسید کربن، مثبت و معنادار است. همچنین، اثرگذاری رشد اقتصادی بر انتشار دی اکسید کربن مثبت و معنادار است.

۲-۲. مطالعات خارجی

لو و لی (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های پانل ۹۷ کشور در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ و مدل‌های اقتصادسنجی فضایی، تأثیر توسعه مالی بر انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که توسعه مالی در کشورهای همسایه اثر سرریزی منفی و معناداری بر انتشار CO_2 دارد که از اثر مستقیم مثبت آن قوی‌تر است. (*Lv and Li, 2021*) وو و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل STIRPAT و مدل‌های اقتصادسنجی فضایی، تأثیر قیمت انرژی و آزادی اقتصادی بر انتشار دی‌اکسیدکربن در اروپا را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد افزایش قیمت انرژی و آزادی اقتصادی

در یک کشور، علاوه بر کاهش انتشار CO_2 آن کشور، موجب کاهش انتشار در کشورهای همسایه نیز می‌شود. (*Wu et al, 2022*) ژیتو و چینیانگا (۲۰۲۳) به آزمون فرضیه‌های منحنی کوزنتس محیط‌زیستی (EKC) و پناهگاه آلودگی (PH) در ۳۵ کشور زیرصحرای آفریقا (SSA) طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵ با استفاده از از مدل پانل فضایی دوربین (SDM) پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که فرضیه EKC تنها برای کاهش منابع طبیعی معتبر است و برای انتشار دی‌اکسیدکربن صدق نمی‌کند. همچنین، فرضیه PH را تأیید می‌کند. (*Jeetoo and Chinyanga, 2023*) مطالعه یانکیویچ و شولتز (۲۰۲۱) با بهره‌گیری از مدل دوربین فضایی- زمانی[1]، به بررسی پیوند میان آلودگی هوا، رشد اقتصادی و مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر طی دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ پرداختند. یافته‌ها نشان داد که تغییرات ساختاری در مصرف انرژی، به‌ویژه افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورهایی چون ایتالیا، چین، نروژ و برزیل، به کاهش انتشار CO_2 کمک کرده است. (*Jankiewicz and Szulc, 2021*) پژوهش‌های اخیر درباره رابطه آزادسازی تجاری و انتشار CO_2 نتایج متناقضی داشته‌اند. برخی مطالعات (مانند شن و همکاران، ۲۰۲۲) نشان می‌دهند تجارت بین‌الملل، به‌ویژه در صنایع با شدت کربنی بالا مانند نساجی و شیمیایی، از طریق انتقال کربن تجسم‌یافته نقش مهمی در افزایش انتشار دارد. (*Rehan et al*، 2023) در مقابل، دوان و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که آزادسازی تجاری اثر معناداری بر انتشار کربن ندارد. رابطه میان تجارت و انتشار CO_2 پیچیده و وابسته به شرایط ساختاری و نهادی کشورهاست. برخی مطالعات، از جمله احمد و همکاران (۲۰۲۳)، حتی وجود رابطه علّی گرنجر میان گشودگی تجاری و انتشار کربن را مردود دانسته‌اند. (*Shen et al, 2022; Rehan et al, 2023; Duan et al, 2022, Ahmad et al, 2023*) تحقیقات اخیر نیز نشان می‌دهند که اثر آزادسازی تجاری بر انتشار CO_2 به عوامل زمینه‌ای متعددی وابسته است. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) بیان می‌کنند که این اثرات به شدت تابعی از میزان اتکا به صادرات، تغییرات در ساختار اقتصادی کشورها و میزان پذیرش فناوری‌های پاک و کارآمد انرژی است. بنابراین، تنها افزایش حجم تجارت بدون اصلاح ساختار مصرف انرژی و ارتقای کارایی فناوری‌ها نمی‌تواند تأثیر مطلوبی بر کاهش انتشار CO_2 داشته باشد. (*Wang et al, 2023*) اساندوه و همکاران (۲۰۲۰)

[1] Spatio-temporal Durbin Model

نشان دادند که در کشورهای توسعه‌یافته، سرمایه‌گذاری خارجی در بلندمدت موجب کاهش انتشار CO_2می‌شود، زیرا این کشورها معمولاً فناوری‌های پاک وارداتی را جذب می‌کنند. در مقابل، در کشورهای در حال توسعه، FDI غالباً رابطه‌ای مثبت با انتشار کربن دارد؛ زیرا سرمایه‌گذاری خارجی غالباً در صنایعی با شدت کربنی بالا صورت می‌گیرد (شی و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، اثرات سرریز FDI می‌تواند از مسیر رشد اقتصادی نیز به کاهش انتشار CO_2 کمک کند. (ادکانتری و آمار، ۲۰۲۲) بنابراین، FDI ممکن است نقش دوگانه‌ای ایفا کند: از یک سو به عنوان «پناهگاه آلودگی» عمل کند و از سوی دیگر، فناوری‌های پاک و روش‌های مدیریت کارآمد به کشور میزبان منتقل شود (گیامفی، ۲۰۲۱؛ خان و همکاران، ۲۰۲۲). (*Essandoh et al, 2020; Xie et al, 2020; Adekantari and Amar, 2022; Gyamfi, 2021; Khan et al, 2022*) حریفانی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل تصحیح خطای برداری (VECM) به تحلیل جامع نقش متغیرهای کلان اقتصادی (رشد اقتصادی، سرمایه‌گذاری خارجی، تجارت، امور مالی، انرژی و انرژی‌های تجدیدپذیر) در انتشار CO_2در کشورهای چین، ژاپن، کره جنوبی، استرالیا و اندونزی طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج آزمون هم‌انباشتگی بلندمدت نشان داد که رشد اقتصادی و سرمایه‌گذاری خارجی می‌توانند به کاهش انتشار کربن کمک کنند. در کوتاه‌مدت، آزمون علیت گرنجر نشان داد که بین رشد اقتصادی و انتشار CO_2 رابطه دوسویه وجود دارد. در عین حال، مصرف انرژی فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر هر کدام دارای رابطه علّی یک‌سویه با انتشار کربن هستند. (*Hariyani et al, 2024*) سابو و همکاران (۲۰۲۴) بر اهمیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان ضرورتی برای توسعه اقتصادی پایدار تأکید کرده‌اند. آنها با بررسی رابطه بین توسعه اقتصادی و انتشار CO2 در کشورهای اروپایی، الگویی خاص را نشان دادند. این الگو نیازمند داده‌های طولی گسترده‌تر برای تأیید است. (*Szabó et al, 2024*) رن و همکاران (۲۰۲۵) مروری نظام‌مند از کاربردهای مدل‌های اقتصادسنجی فضایی در تحلیل انتشار کربن را ارائه نمودند. این مدل‌ها در شناسایی الگوهای مکانی، عوامل تأثیرگذار، و تکامل زمانی انتشار کربن کارآمد هستند. (*Ren et al, 2025*) بابیلون و شاپیرو[1] (۲۰۲۵) به بررسی نحوه تأثیرگذاری کالاها و سیاست‌های زیست‌محیطی بر الگوهای فضایی

[1]

فعالیت‌های اقتصادی می‌پردازند و تحلیل می‌کنند که چگونه تغییرات اقلیمی در دهه‌های آتی این تأثیرات را دستخوش تحول خواهد کرد. علاوه بر این، چارچوب مفهومی و سازه‌های بنیادی برای تدوین مقالات تحقیقاتی و پیشبرد مرزهای دانش در حوزه اقتصاد زیست‌محیطی-فضایی را ترسیم می‌کند. (*Balboni & Shapiro, 2025*) این مطالعه با تمرکز بر هشت کشور خاورمیانه و استفاده از متغیرهای بومی نشان داد تولید سرانه نفت تأثیر مثبتی بر انتشار CO_2 دارد. مدل‌های فضایی نشان می‌دهند وابستگی مکانی میان کشورها وجود دارد؛ بنابراین سیاست‌های هماهنگ فراملی و همکاری منطقه‌ای ضروری است.

۳. تصریح مدل

در مطالعه کاپور و همکاران (۲۰۰۷)، تمرکز اصلی بر برآورد مدل پانل فضایی با اثرات تصادفی است که در آن فرض می‌شود متغیرهای توضیحی با مؤلفه‌های خطا همبسته نیستند. این فرض در کاربردهای تجربی اغلب فاقد اعتبار است، لذا استفاده از مدل‌های اثرات ثابت ترجیح داده می‌شود. نمونه بارز در مطالعات غیرفضایی، مدل‌سازی تابع درآمد افراد است که در آن توانایی ذاتی فرد (اثر ثابت) با سطح تحصیلات (متغیر توضیحی) همبستگی دارد. (*Kapoor et al, 2007; Baltagi, 2008*)

به‌طور مشابه، در تحلیل جریان‌های تجارت دوجانبه نیز مطالعات تجربی نشان داده‌اند که مدل‌های اثرات تصادفی معمولاً به نفع مدل‌های اثرات ثابت رد می‌شوند، زیرا متغیرهای مشاهده‌نشده‌ی خاص کشورها که بر تجارت تأثیرگذارند (نظیر سیاست‌های تجاری یا نهادهای اقتصادی) به احتمال زیاد با متغیرهای توضیحی همبسته هستند. (ایگر، ۲۰۰۰) این شواهد تجربی در مجموع بر ضرورت استفاده از چارچوب اثرات ثابت در مطالعات پانل تأکید دارند، به‌ویژه هنگامی که ساختار داده‌ها امکان بروز همبستگی بین مؤلفه‌های خطا و متغیرهای توضیحی را فراهم می‌سازد. (*Egger, 2000*)

از منظر نظری، مدل پانل فضایی مورد نظر در این مقاله فراتر از مدل‌های مرسوم است و اجازه‌ی ورود وقفه فضایی در متغیر وابسته را نیز می‌دهد؛ عنصری که اهمیت بالایی در بررسی تعاملات جغرافیایی بین واحدهای مقطعی دارد و پیچیدگی‌های بیشتری را در تخمین و تفسیر مدل وارد می‌کند. نویسندگان در ادامه، برآوردگر اثرات تصادفی را برای این مدل تعمیم‌یافته‌ی فضایی بررسی می‌کنند و با استفاده از نتایج جبری پیشرفته (که مبتنی بر قضایای ماتریسی در کتاب مرجع جانسون

و ویچرن (۱۹۸۵) است) ویژگی‌های نظری و محدودیت‌های کاربردی این رویکرد را مورد تحلیل قرار می‌دهند. (*Janson and Wichern, 1985*) با توجه به پیشرفت‌های اخیر در اقتصادسنجی فضایی و بر پایه مطالعات پیشگامانه‌ی کاپور، کلجیان و پروچا (۲۰۰۷)، در این پژوهش از مدل پانل با اثرات ثابت فضایی[1] استفاده می‌شود تا وابستگی‌های زمانی و مکانی موجود در داده‌های زیست‌محیطی کشورهای منتخب به‌درستی لحاظ گردد. ویژگی بارز این مدل، وارد کردن متغیر وابسته با وقفه‌ی فضایی[2] است که برای بررسی اثرات سرریز ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بین کشورها ضروری است. فرم کلی مدل خودرگرسیون فضایی (SAR) با اثرات ثابت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y_{it} = \rho \sum_{j} \omega_{ij} y_{it} + X_{it}\beta + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \qquad (۱)$$

که در آن، y_{it} نشان‌دهنده میزان تخریب زیست‌محیطی (مانند انتشار سرانه CO_2) در کشور i در سال t است؛ ρ ضریب خودرگرسیونی فضایی است که شدت وابستگی فضایی را نشان می‌دهد؛ ω_{ij} عناصر ماتریس وزن فضایی W هستند که شدت وابستگی یا مجاورت جغرافیایی بین کشورها را نشان می‌دهند؛ X_{it} برداری از متغیرهای توضیحی در کشور i و زمان t است؛ μ_i اثرات ثابت کشورها را نشان می‌دهد (ویژگی‌های غیرقابل مشاهده و ثابت در طول زمان)؛ λ_t اثرات زمانی مشترک بین کشورها را منعکس می‌کند؛ ε_{it} جمله خطای مختص به کشور و زمان است. انتخاب مشخصه‌ی اثرات ثابت ناشی از این فرض است که احتمال دارد ویژگی‌های خاص کشورهای مختلف (مانند ساختار نهادی، جغرافیا، منابع طبیعی و...) با متغیرهای توضیحی همبسته باشند، و در نتیجه مدل اثرات تصادفی نتایج سوگیر ارائه دهد . در این مطالعه، متغیر وابسته y_{it} برابر با انتشار سرانه‌ی دی‌اکسیدکربن (CO_2 per capita) است که یکی از شاخص‌های اصلی تخریب زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود. متغیرهای توضیحی منتخب نیز که در بردار X_{it} گنجانده شده‌اند، مطابق با چارچوب منحنی کوزنتس زیست‌محیطی (EKC) و با استناد به ادبیات پیشین، شامل موارد زیر هستند: کربن، تولید نفت، میزان کل تولید برق، برق تولیدی با منابع فسیلی، گاز و نفت، تولید سرانه گاز و نفت، نرخ رشد تولید ناخالص داخلی(GDP)، شدت انرژی مصرفی اولیه. انتخاب این متغیرها بر پایه

[1] Spatial Fixed Effects Panel Model

[2] Spatially Lagged Dependent Variable

مطالعاتی همچون دو و لین (۲۰۱۸)، می و همکاران (۲۰۱۶)، و پائو و سی (۲۰۱۰)، الخطلان و جاوید (۲۰۱۵)، اساندون و همکاران (۲۰۲۰)؛ سابو و همکاران (۲۰۲۴)؛ شهبازی و همکاران (۱۳۹۴) صورت گرفته است. وارد کردن وقفه فضایی متغیر وابسته به مدل، امکان تحلیل اثرات زیست‌محیطی کشورهای همسایه بر یکدیگر را فراهم می‌سازد، که از اهمیت بالایی در تحلیل سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای برخوردار است. (*Dou & Lin, 2018; Mi et al, 2016; Pao & Tsai, 2-10; Alkhathlan & Javid, 2015; Essandoh et al, 2020; Szabó et al, 2024*)

برآورد مدل با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی[1] ویژه‌ی داده‌های پانل فضایی انجام می‌شود تا نتایجی سازگار و کارا به‌دست آید. برای آزمون فروض مدل، آزمون نرمال بودن باقی‌مانده‌ها[2] و آزمون خودهمبستگی فضایی در باقی‌مانده‌ها[3] به کار می‌روند. در صورت مشاهده خودهمبستگی فضایی در خطاها، پیشنهاد می‌شود که اصلاحاتی نظیر استفاده از مدل خطای فضایی[4] یا بازتعریف ماتریس وزن انجام گیرد.

شاخص موران: برای بررسی وجود همبستگی فضایی میان سطوح تخریب زیست‌محیطی در کشورهای مورد مطالعه، از شاخص موران[5] استفاده شده است که یکی از رایج‌ترین معیارها برای ارزیابی خودهمبستگی فضایی در داده‌های پانلی و مقطعی به‌شمار می‌رود. این شاخص نخستین‌بار توسط کلیف و اُرد (۱۹۷۰) معرفی شد و در مطالعات بعدی نظیر انسِلین (۱۹۹۵) توسعه یافت. فرمول کلی شاخص موران به صورت زیر است:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} W_{ij} y_i y_j}{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}$$

که در آن، n تعداد کشورها در نمونه؛ y_{it} انحراف متغیر تخریب زیست‌محیطی کشور i از میانگین آن؛ ω_{ij} عنصر ij ام ماتریس وزن فضایی W است که معمولاً به‌صورت معکوس فاصله جغرافیایی بین

[1] Maximum Likelihood Estimation

[2] Shapiro-Wilk

[3] Moran's I

[4] Spatial Error Model

[5] Moran's I

دو کشور تعریف می‌شود، یعنی: $\omega_{ij} = \frac{۱}{\delta_{ij}}$، به شرطی که: $i \neq j$ باشد؛ δ_{ij}، فاصله اقلیدسی بین کشورهای i و j است. در اینجا، ماتریس مجاورت جغرافیایی باینری[1] است: وزن ۱ اگر دو کشور مرز مشترک زمینی/دریایی داشته باشند، در غیر این صورت ۰. سپس، هر ردیف نرمالیزه شده است (مجموع هر ردیف = ۱). این ماتریس با استفاده از نقشه‌های جغرافیایی استاندارد (مانند مرزهای کشورهای خاورمیانه) ارائه شده است. تمرکز بر مجاورت مستقیم به دلیل ماهیت سرریزهای منطقه‌ای (آلودگی فرامرزی، تجارت انرژی) است. مقادیر شاخص موران بین ۱- و ۱+ متغیر است. اگر $I > ۰$ باشد، حاکی از خوشه‌بندی فضایی مثبت و وجود الگوی مشابه تخریب زیست‌محیطی میان کشورهای همجوار است؛ در صورتی که $I < ۰$ باشد، بیانگر همبستگی منفی فضایی است؛ و اگر مقدار شاخص نزدیک به صفر باشد، نشان‌دهنده عدم وجود الگوی فضایی مشخص یا تصادفی بودن پراکنش است. آزمون شاپیرو–ویلک[2] یکی از معتبرترین و پراستفاده‌ترین آزمون‌های آماری برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، به‌ویژه در نمونه‌های کوچک تا متوسط، است. در زمینه اقتصادسنجی، این آزمون غالباً برای آزمون نرمال بودن باقی‌مانده‌های مدل[3] استفاده می‌شود تا از اعتبار فروض کلاسیک OLS یا سایر مدل‌ها اطمینان حاصل شود. همچنین، آزمون جیتس ارد- جی[4]، بر باقی‌مانده‌های مدل پانل فضایی با اثرات ثابت انجام شد. به طور خلاصه، رنگ‌های قرمز تیره تا روشن، بیانگر خوشه‌های داغ[5] با شاخص مثبت بالا و معناداری در سطح ۹۵ درصد و بیشتر است. رنگ‌های آبی تیره تا روشن نیز خوشه‌های سرد[6] با امتیاز منفی بالا را نشان می‌دهد. رنگ‌های زرد و سبز نیز مناطق بدون خوشه معنادار فضایی را نشان می‌دهد. (*Getis & Aldstadt*، ۲۰۱۰)

۴. ارزیابی مدل

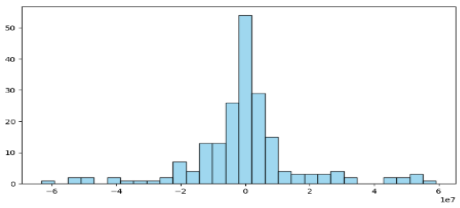
در این مطالعه، به منظور لحاظ کردن وابستگی فضایی میان کشورها، از مدل خودرگرسیون فضایی[7] در چارچوب داده‌های پنلی با اثرات ثابت استفاده شده است. این انتخاب مبتنی بر رویکرد ارائه‌شده توسط الهورست (۲۰۱۴) است که تأکید می‌کند در صورت وجود وابستگی فضایی در متغیر وابسته،

[1] binary contiguity
[2] Shapiro–Wilk Test
[3] Residuals
[4] Getis-Ord Gi
[5] Hot Spots
[6] Cold Spots
[7] Spatial Autoregressive Model (SAR)

مدل SAR گزینه مناسبی برای برآورد است. لازم به ذکر است که داده‌های مورد استفاده در این مطالعه دارای ساختار پانلی و شامل مجموعه‌ای از کشورها در یک دوره زمانی مشخص هستند. ماتریس وزن‌های فضایی (W) بر اساس مجاورت جغرافیایی[1] تعریف شده است، به طوری که اگر دو کشور مرز مشترک جغرافیایی داشته باشند، وزن ۱ و در غیر این صورت وزن ۰ دریافت می‌کنند. این ماتریس سپس بر اساس سطر نرمالیزه شده است (مجموع وزن‌های هر ردیف برابر ۱). با توجه به تعداد محدود کشورها (۳ کشور) و تمرکز مطالعه بر سرریزهای منطقه‌ای مستقیم (مانند تجارت انرژی و آلودگی فرامرزی)، از تعریف ساده مجاورت استفاده شد تا از مشکلات تخمینی ناشی از ماتریس‌های پیچیده‌تر (مانند فاصله معکوس[2]) در نمونه کوچک جلوگیری شود. این رویکرد در مطالعات انتشار CO_2 در سطح کشوری رایج است (مانند مطالعات بر روی کشورهای همسایه در مناطق خاص).مدل اصلی مورد استفاده در تحقیق، مدل پانل خطای فضایی با اثرات ثابت زمانی و مکانی[3] و با خطای فضایی $N\left(۰,\sigma^{۲}\right)\sim\varepsilon_{it},u_{it}=\lambda_{it}W_{u}+\varepsilon_{it}$ است و به صورت زیر بیان می‌شود:

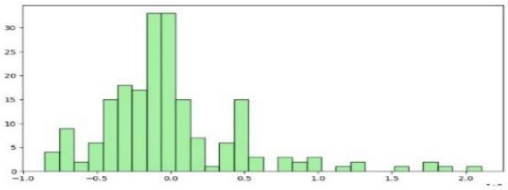
$$CO_{۲it}=\beta_{۰}+\beta_{۱}OIL_{it}+\beta_{۲}GE_{it}+\beta_{۳}FO_{it}+\beta_{۴}GAS_{it}+\beta_{۵}GGDP_{it}+\beta_{۶}E_{it}+u_{it} \quad (۱)$$

متغیر وابسته انتشار دی‌اکسیدکربن بوده و متغیرهای توضیحی شامل شاخص‌های شدت انرژی، ساختار تولید برق، تولید برق با منابع فسیلی، تولید نفت و گاز و رشد اقتصادی هستند و درجه پایایی آنها صفر $\left(I\left(۰\right)\right)$ هستند. شایان ذکر است که داده‌ها از نوع پانل نامتوازن هستند.



شکل ۱. هیستوگرام باقیمانده‌ها در مدل پانل فضایی با اثرات ثابت (منبع: یافته‌های تحقیق)

[1] binary contiguity
[2] Adverse Distance
[3] Fixed Effects Spatial Lag Model



شکل ۲. هیستوگرام باقیمانده‌ها در مدل خطای فضایی (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول ۱: ضرایب مدل پانل فضایی (منبع: یافته‌های تحقیق)

مدل اثرات ثابت				
نام متغیر	نماد متغیر	مقدار p	ضریب برآورد شده	تفسیر
عرض از مبدأ	C	۰/۰۱۲	-۶۴۱۱۰۰۰۰	عرض از مبدأ منفی و معنادار است.
تولید نفت	Oil	۰/۰۰۰۱	۴۴۵۵۰	تولید کل نفت اثر مثبت و بسیار معنادار بر انتشار CO_2 دارد.
تولید برق	GE	۰/۱۳۴۹	۳۱۴۳۰۰	تولید کل برق دارای اثر مثبت اما از نظر آماری غیرمعنادار است.
مصرف برق فسیلی سرانه	FO	۰/۰۳۰۲	۴۷۵۹/۲	برق تولیدی از منابع فسیلی اثر مثبت و معنادار دارد.
تولید گاز سرانه	GAS	۰/۰۲۵۸	-۴۱۲۴/۹	تولید سرانه گاز و نفت اثر منفی و معنادار دارد.
رشد اقتصادی	GGDP	۰/۱۴۲۲	-۳۰۰۵۰۰	نرخ رشد تولید ناخالص داخلی اثر منفی اما غیرمعنادار دارد.
شدت انرژی مصرفی	E	۰	۹۳۹۸۰۰	شدت انرژی مصرفی اولیه مهم‌ترین عامل افزایش انتشار CO_2است؛ افزایش ۱٪ شدت انرژی منجر به حدود ۰/۹۴ درصدی افزایش انتشار می‌شود.
مدل اثرات تصادفی				
نام متغیر	نماد متغیر	مقدار احتمال	ضریب برآوردشده	تفسیر
تولید نفت	Oil	۰	۶۴۳۶۰	اثر تولید نفت مثبت و معنادار است
تولید برق	GE	۰/۴۶۷۶	-۱۷۷۹۰۰	تولید کل برق منفی و غیرمعنادار است.
مصرف برق فسیلی سرانه	FO	۰/۷۲۳۹	۱۰۰۲	اثر برق فسیلی غیرمعنادار است.
تولید گاز سرانه	GAS	۰/۷۶۷۴	۶۳۱/۵۸	تولید سرانه گاز مثبت و غیر معنادار است.
رشد اقتصادی	GGDP	۰/۵۸۰۵	۶۰۴۰۰۰	نرخ رشد اقتصادی مثبت و غیرمعنادار است.

شدت انرژی مصرفی	E	۰/۴۱۴۹	-۲۶۳۴۰۰۰	شدت انرژی مصرفی منفی و غیرمعنادار است.
مدل خطای فضایی با اثرات ثابت				
نام متغیر	نماد متغیر	مقدار احتمال	ضریب برآوردشده	تفسیر
تولید نفت	Oil	۰	۵۸۲۸۰/۵۷	اثر مثبت و معنادار است.
تولید برق	GE	۰/۰۰۰۱	-۲۰۸۱۸۳/۳	اثر منفی و معنادار است.
مصرف برق فسیلی سرانه	FO	۰/۲۰۶۹	-۱۳۲۲/۹۸	اثر آن منفی و غیر معنادار است.
تولید گاز سرانه	GAS	۰/۰۱۲۴	۳۳۲۷/۴۷	اثر آن مثبت و معنادر است.
رشد اقتصادی	GGDP	۰/۰۲۵۷	-۱۰۵۹۳۶۷	اثر آن منفی و معنادار است.
شدت انرژی مصرفی	E	۰	۲۰۸۱۸۳/۵	اثر آن مثبت ولی غیرمعنادار است.
اثر فضایی انتشار CO2		۰	۰/۸۰۵	ضریب وابستگی فضایی مثبت و بسیار معنادار است و وجود سرریزهای فضایی قوی در انتشار کربن دی اکسید بین واحدها را تأیید می‌کند.

منبع: یافته‌های تحقیق

بر اساس آزمون هاسمن، مدل اثرات ثابت ترجیح داده شد و مدل اثرات تصادفی رد شد. آزمون‌های نرمالی باقیماندهها در مدل با اثرات ثابت به شرح ذیل است:

جدول ۲: آزمون‌های نرمالی باقیمانده‌ها در مدل اثرات ثابت و خطای فضایی

	مدل اثرات ثابت		مدل خطای فضایی	
آزمون	**مقدار**	**آماره**	**مقدار**	**آماره**
شاپیرو- ویلک[1]	۰	۰/۸۸	۰	۰/۸۸
جارکیو- برا[2]	۰	۹۳/۸۰۹	۰	۱۸۰/۳۷
کولموگروف- اسمیرنف[3]	۰/۰۰۰۰۲۷	۰/۱۶۶	-	-
چولگی[4]	-	۰/۱۶۴	-	۱/۵۲۳
کشیدگی[5]	-	۳/۳۴	-	۳/۵۱۷

[1] Shapiro-Wilk

[2] Jarque–Bera

[3] Kolmogorov–Smirnov

[4] Skewness

[5] Kurtosis

منبع: یافته‌های تحقیق

در مدل پانل با اثرات ثابت، آماره شاپیرو- ویلک با توجه به احتمال بسیار کوچک، فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها رد می‌شود. مطابق با آزمون جارک- برا نیز نرمال بودن باقیمانده‌ها تأیید نمی‌شود و این امر نشاندهنده انحراف از توزیع نرمال است. آزمون کولموگروف- اسمیرنف نیز مؤید آنست که توزیع باقیمانده‌ها از نرمال فاصله دارد. چولگی نزدیک به صفر است و کشیدگی کمی بالاتر از توزیع نرمال قرار دارد و نشاندهنده آنست که باقیمانده‌ها تقریباً متقارن است ولی کمی سنگین‌تر از نرمال هستند. در نتیجه، مدل با اثرات ثابت، باقیمانده‌های نرمال ندارند و بنابراین، مدل خطای فضایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مدل نیز آزمون‌های شاپیرو (با مقدار ۰/۸۸ و احتمال ۰) و جارک- برا (با مقدار ۱۸۰/۳۷ و احتمال ۰)، نرمال بودن کامل باقیمانده‌ها را تأیید نمی‌کنند ولی نسبت به مدل پانل فضایی با اثرات ثابت، باقیمانده‌ها بهتر و متراکم‌تر حول مقادیر برآورد شده هستند. چولگی مثبت (۱/۵۲) و کشیدگی (۳/۵۱) نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها کمی به سمت راست سنگین‌تر شده‌اند، کشیدگی نیز مشابه مدل پانل فضایی با اثرات ثابت است. در مدل پانل خطای فضایی با اثرات ثابت، ضریب وابستگی فضایی خطا به میزان ۰/۸۰۵ با احتمال صفر معنادار است. این نتیجه نشان می‌دهد که شوک‌های غیرقابل مشاهده مؤثر بر انتشار CO_2 در هر کشور به‌طور قوی تحت تأثیر کشورهای همسایه قرار دارند. پس از کنترل این وابستگی فضایی، ضرایب تولید برق و نرخ رشد اقتصادی معنادار می‌شوند که بیانگر بهبود کیفیت نهادی و رشد اقتصادی سازگار با کاهش انتشار CO_2 در چارچوب فضایی است. مقدار Pseudo R-squared برابر با ۰/۸۲۵ نیز نشان‌دهنده برازش بسیار مناسب مدل فضایی در مقایسه با مدل غیر فضایی است. این یافته از منظر اقتصاد محیط‌زیست و سیاست‌گذاری اقلیمی حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که اثرات سرریز فضایی[1] در انتشار آلاینده‌ها وجود دارند و اقدام سیاستی در یک کشور، بدون در نظر گرفتن اثرات منطقه‌ای و همکاری‌های فرامرزی، ممکن است ناکافی باشد. در مدل پانل با اثرات ثابت، مقدار آماره موران برابر ۰/۰۵۸ با احتمال ۰/۱۵۳ است که نشان می‌دهد وابستگی فضایی کلان در میانگین باقیمانده‌ها کم و غیرمعنادار است. پس از استفاده از مدل خطای فضایی، این شاخص کاهش می‌یابد (تقریباً صفر)، که نشان می‌دهد مدل خطای فضایی وابستگی فضایی در سطح کلان را تصحیح کرده و اثر آن را

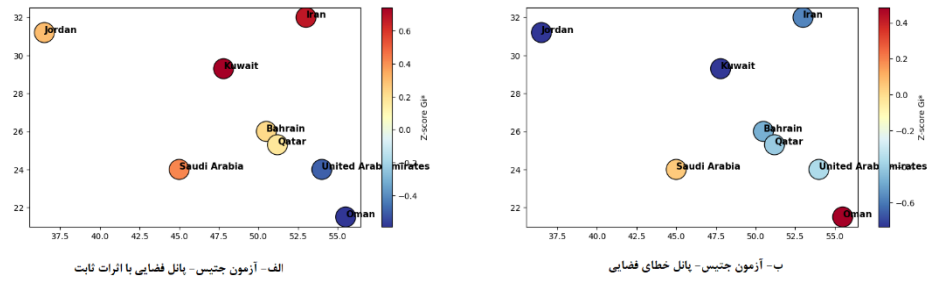
[1] spatial spillovers

کنترل می‌کند. در مدل پانل فضایی با اثرات ثابت، آماره جری برابر ۰/۵۹۳ با احتمال کمتر از پنج صدم است، که نشان‌دهنده وجود خوشه‌بندی مثبت در سطح محلی است؛ یعنی برخی کشورها در مقادیر CO_2 مشابه با هم قرار دارند. مدل خطای فضایی این وابستگی محلی را کاهش می‌دهد (تقریباً یک)، که بیانگر تصحیح اثرات محلی ناشی از خطای فضایی است. در مدل پانل فضایی با اثرات ثابت، برخی کشورها به عنوان خوشه‌های داغ یا سرد شناسایی می‌شوند. پس از اعمال مدل خطای فضایی، شدت خوشه‌بندی کاهش می‌یابد و خوشه‌ها کمتر مشخص هستند، که نشان می‌دهد مدل خطای فضایی می‌تواند اثرات خوشه‌ای محلی را کنترل کند و تخمین ضرایب مدل را از سوگیری‌های ناشی از وابستگی فضایی خطا محافظت نماید.

جدول ۳: آزمون‌های تشخیصی وابستگی فضایی اولیه

آزمون	مدل پانل فضایی با اثرات ثابت		مدل خطای فضایی	نتیجه
	آماره	مقدار p		
موران[1]	۰/۰۵۸	۰/۱۵۳	کاهش (تقریباً صفر بعد از اصلاح)	وابستگی فضایی کلان در پانل فضایی با اثرات ثابت کم و غیر معنادار است ولی خطای فضایی، آن را کنترل می‌کند.
آزمون جری[2]	۰/۵۹۳	۰/۰۴۴	کاهش (تقریباً یک)	وابستگی محلی، مثبت در مدل پانل با اثرات ثابت وجود دارد ولی مدل پانل خطای فضایی، وابستگی محلی را کاهش می‌دهد.
آزمون جتیس	خوشه‌ها کمتر مشخص هستند		کاهش خوشه‌بندی (تقریباً حذف خوشه‌ها)	مدل پانل خطای فضایی، اثرات خوشه‌ای محلی را کنترل می‌کند

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل ۳. آزمون جیتس (منبع: یافته‌های تحقیق)

[1] Moran's I
[2] Geary's C

مطابق شکل (۳)، در تحلیل فضایی انجام‌شده روی داده‌های پانل انتشار CO_2 در ۸ کشور خاورمیانه (ایران، عربستان سعودی، امارات متحده عربی، قطر، بحرین، کویت، عمان و اردن) از آزمون جیتس-ارد جِی استار[1]، به عنوان یکی از شاخص‌های آزمون محلی خودهمبستگی فضایی[2] برای شناسایی خوشه‌های فضایی[3] معنادار در باقی‌مانده‌های مدل استفاده شده است. این آزمون در دو دو مرحله اعمال گردید. در بخش (الف)، پیش از تصریح وابستگی فضایی، الگوی خوشه‌بندی فضایی محلی به شرح ذیل مشاهده می‌شود: کشورهای حاشیه خلیج فارس به ویژه کویت و عمان، خوشه‌های سرد معنادار (آبی تیره با شاخص منفی قابل توجه) نشان می‌دهند؛ به این معناست که باقی‌مانده‌های منفی (انتشار واقعی کمتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل) در این کشورها به صورت فضایی متمرکز و خوشه‌ای هستند. در مقابل، ایران و اردن، خوشه‌های داغ (رنگ قرمز تیزه با شاخص مثبت بالا) دارند؛ یعنی باقی‌مانده‌های مثبت (انتشار واقعی بالاتر از پیش‌بینی مدل) در این دو کشور به صورت محلی خوشه شده است. کشورهای بحرین، قطر، عربستان سعودی و امارات متحده عربی عمدتاً در محدوده امتیاز- Z نزدیک به صفر یا نزدیک به مرز معناداری آماری (رنگهای نارنجی/ آبی کم رنگ یا زرد) قرار گرفته‌اند و هیچ خوشه داغ یا سرد قوی و معنادار (در سطح ۱٪ یا ۵٪) از خود نشان نمی‌دهند. این الگو به وضوح وجود خودهمبستگی فضایی محلی معنادار در باقیمانده‌های مدل پانل با اثرات ثابت را تأیید می‌کند و نشاندهنده توزیع غیرتصادفی خطاها از نظر جغرافیایی است. در بخش (ب)، پس از برآورد مدل خطایی فضایی و وارد نمودن پارامتر خطای فضایی λ، تغییرات اساسی در الگوی فضایی باقیمانده‌ها رخ داده است. شدت رنگ‌ها در سراسر نقشه به طور چشمگیری کاهش یافته است و تقریباً تمام کشورها (از جمله کویت، عمان، اردن و ایران که پیشتر خوشه‌های قوی داشتند) به محدوده رنگ‌های خنثی (زرد، سبز روشن یا آبی بسیار کم‌رنگ با امتیاز- Z نزدیک به صفر) منتقل شده‌اند. هیچ یک از هشت کشور مورد بررسی خوشه داغ یا سرد معنادار قوی (با رنگ قرمز یا آبی تیره و سطح معناداری آماری قابل قبول) نشان نمی‌دهد. حذف تقریباً کامل خوشه‌های معنادار فضایی پس از اعمال مدل خطای فضایی، شواهد محکمی است بر اینکه مدل موفق به جذب

[1] Getis-Ord Gi

[2] Local Indicator of Spatial Association - LISA

[3] spatial clusters

و توضیح مناسب وابستگی فضایی موجود در داده‌ها شده است و باقیمانده‌های نهایی از نظر فضایی تصادفی هستند. این نتیجه، نه تنها برتری مدل فضایی نسبت به مدل کلاسیک پانل (فاقد مؤلفه فضایی) را در این مجموعه داده تأکید می‌کند، بلکه نشاندهنده آن است که وابستگی فضایی مشاهده شده در مرحله اول عمدتاً ناشی از خطای فضایی بوده است و با لحاظ کردن آن در ساختار مدل، ساختار فضایی سیستماتیک از باقیمانده‌ها حذف شده است. نتایج نشان می‌دهند رویکردهای صرفاً ملی در برابر تغییرات اقلیمی ناکافی است و هماهنگی میان‌کشوری ضرورت دارد.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که بین کشورهای منتخب خاورمیانه وابستگی فضایی معناداری در الگوهای انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) وجود دارد و عوامل اقتصادی و انرژی‌محور اصلی تأثیرات مستقیم و معناداری بر آن دارند. ضریب وابستگی فضایی در مدل خطای فضایی برابر با ۰/۸۰۵ و با سطح معناداری صفر است که حاکی از وجود سرریزهای فضایی قوی و تأثیر قابل توجه شوک‌های غیر قابل مشاهده در کشورهای همسایه بر انتشار CO_2 هر کشور است. این موضوع نشان‌دهنده آنست که وجود اثرات سرریز فضایی و ماهیت فرامرزی آلودگی‌های زیست‌محیطی است و تأکید می‌کند که سیاست‌گذاری‌های ملی به تنهایی نمی‌توانند پاسخگوی چالش‌های زیست‌محیطی باشند و همکاری‌های فرامرزی و اقدامات هماهنگ منطقه‌ای ضرورت دارد. برازش بسیار بالای مدل و نرمال بودن خطاها نشان‌دهنده کیفیت تحلیل است، خوشه‌بندی محلی مثبت در مدل پانل با اثرات ثابت وجود داشت، اما پس از اعمال مدل خطای فضایی، شدت خوشه‌ها تقریباً حذف شد و وابستگی فضایی محلی به خوبی کنترل گردید، که اعتبار نتایج و دقت تخمین ضرایب را تقویت می‌کند. در بررسی عوامل اقتصادی و انرژی‌محور، تولید سرانه نفت، تأثیر مثبت و معناداری بر انتشار CO_2 داشته و نشان می‌دهد که وابستگی به تولید نفت با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است؛ این مسئله با واقعیت‌های اقتصادی منطقه خاورمیانه که بر نفت متمرکز است، همخوانی دارد. در مقابل، انرژی سرانه اثر مثبت ولی غیر معناداری بر انتشار داشت. مصرف برق فسیلی اثر معناداری نداشت و نشاندهنده پیچیدگی روابط میان انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن در منطقه است. انواع تولید برق نیز اثر منفی و معناداری دی‌اکسید کربن در مدل خطای فضایی نشان دادند که با مطالعات خدادادی و همکاران (۱۴۰۱) و دو و لین (۲۰۱۸) همخوانی دارد. اثر فضایی قوی (۰/۸۰۵) نیز با مطالعات شهبازی و همکاران (۱۳۹۴)، خدادادی و همکاران (۱۴۰۱) و مطالعات ما و همکاران (۲۰۰۹)، الخطلان و جاوید (۲۰۱۵)، وانگ و همکاران (۲۰۱۸)، لو و لی (۲۰۲۱)؛ وو و همکاران (۲۰۲۲)

مطابقت دارد. این همخوانی نشان می‌دهد که پدیده سرریز فرامرزی آلودگی در مناطق جغرافیایی نزدیک (مانند خاورمیانه) یک الگوی رایج است. همچنین، تأثیر مثبت و معنادار تولید نفت سرانه بر انتشار کربن دی اکسید نیز با مطالعات الخطلان و جواد (۲۰۱۵) سازگار است. این یافته با واقعیت اقتصادی خاورمیانه (وابستگی بالا به صادرات نفت) سازگار است و تفاوت این مطالعه را در تمرکز بر متغیرهای خاص انرژی‌محور منطقه (تولید نفت/گاز سرانه) نشان می‌دهد. نتایج مدل‌های اقتصادسنجی فضایی نشان می‌دهد انتشار CO_2 در کشورهای خاورمیانه دارای وابستگی مکانی معنادار است و افزایش انتشار در یک کشور از طریق سرریزهای اقتصادی و انرژی به افزایش انتشار در کشورهای همجوار منجر می‌شود که حاکی از وجود اثرات برون‌ریز فرامرزی است. تأثیر منفی انرژی بر انتشار CO_2 با یافته‌هایی مانند مطالعه دو و لین (۲۰۱۸) و وضعیت کشورهای در حال گذار انرژی همخوانی دارد. همچنین، عدم معناداری رشد اقتصادی و برخی متغیرهای تولید برق با نتایج نیو و همکاران (۲۰۱۱) سازگار است. بنابراین، سیاستگذاران باید همکاری منطقه‌ای را تقویت کرده و اقدامات هماهنگ برای تنوع‌بخشی اقتصادی، ارتقای بهره‌وری انرژی و توسعه انرژی پاک را در اولویت قرار دهند. اهمیت این نتایج از منظر سیاست‌گذاری منطقه‌ای، به ویژه در چارچوب اجلاس‌های بین‌المللی تغییرات اقلیمی[1] تحت کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در تغییرات آب و هوایی (UNFCCC) و توافق پاریس، بسیار برجسته است. اجلاس‌های اخیر تغییرات آب و هوایی، از جمله بیست و هشتمین جلسه تغییرات آب و هوایی در امارات متحده عربی (۲۰۲۳)، بیست و نهمین جلسه تغییرات آب و هوایی در آذربایجان (۲۰۲۴) و سی‌امین نشست تغییرات آب و هوایی در برزیل (۲۰۲۵) بر ضرورت همکاری منطقه‌ای و فرامرزی تأکید کردند. یافته‌ها با اثبات سرریزهای فضایی قوی در انتشار CO_2 میان کشورهای خاورمیانه، ناکافی بودن اقدامات ملی را نشان داده و بر ضرورت همکاری‌های منطقه‌ای در قالب مکانیسم‌های مشترک تجارت کربن، مدیریت منابع آبی فرامرزی و تنوع‌بخشی اقتصادی از نفت تأکید دارند. سیاست‌گذاران باید رویکردی جامع شامل سیاست‌های فراملی، تقویت انرژی‌های پاک، کاهش وابستگی به نفت و بهبود شدت انرژی با ابزارهای مالیاتی اتخاذ کنند.

References

Adekantari, P., & Amar, S. (2022). Analysis of the effect of macroeconomic variables on inflation in ASEAN-5 (Indonesia, Thailand, Philippines, Malaysia and Singapore). *Journal Kajian Ekonomi Dan Pembangunan, 4(1), 55*. *10.24036/jkep.v4i1.13307*

[1] COP

Adeli, Omid Ali; Vali, Masoumeh, (۲۰۱۵), Analysis of the relationship between urbanization, tourism and carbon dioxide emissions in the provinces of Iran, Environment and Cross-Sectoral Development, ۱۰,۲۲۰۳۴/envj.۲۰۲۵,۴۷۸۲۵۰,۱۴۱۳

Aghaei, L., Alizadeh Aghdam Esmaili, F., & Faraji Dizji, S. (2023). The impact of the COVID-19 pandemic on non-renewable energy consumption in OECD countries. Stable Economy, 4(3), 1-26. https://doi.org/10.22111/sedj.2023.45634.1345

Ahmad, A., et al (2023). Nexus between institutional quality, employment, trade openness & CO_2 emissions: A panel ARDL analysis. *Journal of Social Research Development, 4(2), 468–479. 10.53664/JSRD/04-02-2023-20-468-479*

Alkhathlan, K., & Javid, M. (2015). Carbon emissions and oil consumption in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 105–111. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.072*

Balboni, C. A., & Shapiro, J. S. (2025). Spatial environmental economics *(Working Paper No. 33377). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w33377*

Du, Z., & Lin, B. (2018). Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry. *Journal of Cleaner Production, 176, 1177–1184. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.215*

Duan, K., et al (2022). The relationship between trade liberalization, financial development and carbon dioxide emission: An empirical analysis. *Sustainability, 14(16), 10308. https://doi.org/10.3390/su141610308*

Egger, P.H., (2000). European Exports and Outward Foreign Direct Investment: A Dynamic Panel Data Approach *(WIFO Working Paper No. 129), Vienna: Austrian Institute of Economic Research.*

Essandoh, O. K., et al (2020). Linking international trade and foreign direct investment to CO_2 emissions: Any differences between developed and developing countries? *Science of The Total Environment, 712, 136437. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136437*

Fetros, M. H., Moridiyan Pirdosti, A., & Nematollahi, F. (2020). Investigating the effect of financial development and economic growth on energy demand in Iran's economy: An asymmetric causality approach. Stable Economy, 1(1), 79-106. https://doi.org/10.22111/sedj.2021.35352.1102

Getis, A., & Aldstadt, J. (2010). Constructing the spatial weights matrix using a local statistic. In L. Anselin & S. J. Rey (Eds.), *Perspectives on spatial data analysis*: 147–163. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01977-7_11

Ghadami Damabi, B., Fetras, M. H., & Haji, G. (2025). Dynamic relationship modeling between institutions, environmental pollution, economic

development and public health based on Bayesian averaging approaches. Stable Economy, 6(3), 133-169. https://doi.org/10.22111/sedj.2025.51265.1580

Ghasemifar, E., Planche, C., Baray, J.-L., Almazroui, M., Ur Rashid, I., Moradi, S., & Topuz, M. (2026). 25-years study (2000–2024) of extreme precipitation following heatwaves in the Middle East: Regional patterns, trends, and atmospheric drivers. *Atmospheric Research*, 330, 108516. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108516

Gyamfi, B. A. (2021). Consumption-based carbon emission and foreign direct investment in oil-producing Sub-Sahara African countries: The role of natural resources and urbanization. *Environmental Science and Pollution Research, 29(9), 13154–13166. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11775-x*

Hariyani, et al. (2024). Unlocking CO_2 emissions in East Asia Pacific-5 countries: Exploring the dynamic relationships among economic growth, foreign direct investment, trade openness, financial development and energy consumption. *Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8(8), 5639. https://doi.org/10.24294/jipd.v8i8.5639*

IEA (۲۰۲۴), World Energy Investment ۲۰۲۴, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-۲۰۲۴, Licence: CC BY ۴,۰

Jankiewicz, M., & Szulc, E. (2021). Analysis of spatial effects in the relationship between CO_2 emissions and renewable energy consumption in the context of economic growth. *Energies, 14(18), 5829. https://doi.org/10.3390/en14185829*

Jeetoo, J., & Chinyanga, E. R. (2023). A spatial econometric analysis of the environment Kuznets curve and pollution haven hypothesis in Sub-Saharan Africa. *Environmental Science and Pollution Research, 30(43), 58169–58188. https://doi.org/10.1007/s11356-023-27913-*

Johnson, R.A. & Wichern, D.W. (1988). *Applied Multivariate Statistical Analysis (2nd ed.), Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.*

Kapoor, M., et al (2007). Panel Data Models With Spatially Correlated Error Components, *Journal of Econometrics, 140(1), 97-130. https://doi.org/10.1016/j.econom.2006.09.004*

Khan, Y., et al (2022). The impact of economic policy uncertainty on carbon emissions: Evaluating the role of foreign capital investment and renewable energy in East Asian economies. *Environmental Science and Pollution Research, 29(13), 18527–18545. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17006-9*

Khezri, M., et al (2021). The spillover of financial development on CO_2 emission: A spatial econometric analysis of Asia-Pacific countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111110. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111110*

Khodadadi, Soraya, Pahlevani, Mosayeb and Hosseinzadeh, Ramadan. (۲۰۱۴). The effect of industrial structure change on carbon dioxide emissions in Iranian provinces: A spatial econometric approach, Quarterly Journal of Environmental Sciences, ۲۰(۱): ۲۳۶-۲۲۱. ۱۰,۵۲۵۴۷/ENVS.۲۰۲۱,۳۶۹۷۹()

Khoddadadi, S, et al (2022). The effect of industrial structure change on carbon dioxide emissions in Iran's provinces: A spatial econometric approach. *Environmental Sciences Quarterly, 20(1), 221–236. (In Persian with English abstract). 10.52547/ENVS.2021.36979*

Kohansal, M. R., & Shayanmehr, S. (2016). The mutual effects of energy consumption, economic growth, and environmental pollution: Application of a spatial simultaneous equations model with panel data. *Iranian Energy Economics Research Journal, 5(19), 179–216. (In Persian with English abstract*). *https://doi.org/10.22054/jiee.2017.7308*

Kohansal, Mohammad Reza and Shayan Mehr, Samira. (۲۰۱۶). The interaction between energy consumption, economic growth and environmental pollution: Application of spatial simultaneous equations model of panel data, Iranian Journal of Energy Economics, ۵(۱۹): ۲۱۶-۱۷۹. https://doi.org/۱۰,۲۲۰۵۴/jiee.۲۰۱۷,۷۳۰۸().

Kumar, S., & Madlener, R. (2016). CO_2 emission reduction potential assessment using renewable energy in India. *Energy, 97, 273–282. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.037*

Lesage, J. P., & Pace, R. K. (2008). Spatial econometric modeling of origin-destination flows. *Journal of Regional Science, 48*(5), 941–967. https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2008.00573.x

Liu, F., & Liu, C. (2019). Regional disparity, spatial spillover effects of urbanisation and carbon emissions in China. *Journal of Cleaner Production, 241, 118226. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118226*

Ma, J., et al (2009). Spatial econometric analysis of China's provincial CO_2 emissions. In 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization (pp. 964–968). *IEEE. https://doi.org/10.1109/CSO.2009.369*

Mansouri Seyed Amin, Armen Seyed Aziz, Andayesh Yaghoub, Khorsand Keyvan. (2014),Studying the impact of energy efficiency and economic growth on carbon dioxide emissions in Iran. Quarterly Journal of Energy Economics Studies.; ۲۱(۸۴):.۷۸-۵۱

Mi, Z., et al (2016). Consumption-based emission accounting for Chinese cities. *Applied Energy, 184, 1073–1081.* https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.094

Naderi Mayvan, R. (۲۰۱۴). Spatial analysis of the impact of air pollution on urban livability (case study: Arak city). Land Planning, ۲۰(۱), ۱۰۴-۸۷. ۱۰,۲۲۰۵۹/JTCP.۲۰۲۴,۳۷۴۰۱۸,۶۷۰۴۴۳

Naderi Mayvan, R. (2024). Spatial analysis of the impact of air pollution on urban livability (Case study: Arak city). *Land Use Planning, 20(1), 87–104. (In Persian with English abstract).* 10.22059/JTCP.2024.374018.670443

Niu, X., et al (2011). Energy consumption and carbon emissions: Analysis and prediction—The case of Hebei Province in China. *Energy Procedia, 5, 2271–2277.* https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.390

Pao, H. T., & Tsai, C. M. (2010). CO_2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. *Energy Policy, 38(12), 7850–7860.* https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.045

Rajabi Kouyakhi, N. (2022). CO2 emissions in the Middle East: Decoupling and decomposition analysis of carbon emissions, and projection of its future trajectory. *Science of The Total Environment, 845, Article 157182.*

Rehan, M., et al. (2023). The effects of trade, renewable energy, and financial development on consumption-based carbon emissions: Comparative policy analysis for the G20 and European Union countries. *Environmental Science and Pollution Research, 30(33), 81267–81287.* https://doi.org/10.1007/s11356-023-28845-2

Ren, X., et al (2025). The application of spatial econometrics in carbon emission research: A systematic literature review. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management, 27(1), 2530001.* https://doi.org/10.1142/S1464333225300019

Sarwar, S., & Alsaggaf, M. I. (2019). Role of urbanization and urban income in carbon emission: Regional analysis of China. *Applied Ecology and Environmental Research, 17(6), 10303–10311.* https://doi.org/10.15666/aeer/1706_1030310311

Shen, Y., et al (2022). Interaction between international trade and logistics carbon emissions. *Energy Reports, 8, 10334–10345.* https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.063

Szabó, Z., et al (2024). Spatial econometric analysis of carbon dioxide emission – European case study. *Promet – Traffic & Transportation, 36(2), 193–202.* https://doi.org/10.7307/ptt.v36i2.436

Tian, J., et al (2019). Structural patterns of city-level CO_2 emissions in Northwest China. *Journal of Cleaner Production, 223, 553–563.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.142

Varahrami, V. (2025). Investigating the short-term and long-term effects of carbon dioxide emissions, renewable energy consumption and economic growth on healthcare expenditures in OPEC member countries. Stable Economy, 6(2), 135-150. https://doi.org/10.22111/sedj.2025.49970.1514

Wang, B., et al (2018). Agglomeration effect of CO_2 emissions and emissions reduction effect of technology: A spatial econometric perspective based on China's province-level data. *Journal of Cleaner Production, 204, 96–106. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.264*

Wang, Q., & Jiang, R. (2019). Is China's economic growth decoupled from carbon emissions?, *Journal of Cleaner Production, 225, 1194–1208. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.352*

Wang, S., et al (2023). Sustainable development in the export trade from a symbiotic perspective on carbon emissions: Exemplified by the case of Guangdong, China. *Sustainability, 15(12), 9667. https://doi.org/10.3390/su15129667*

World Meteorological Organization. (2025). World Meteorological Day 2025: Closing the Early Warning Gap Together. https://wmo.int/site/world-meteorological-day-2025

Wu, J., et al. (2022). The effects of energy price, spatial spillover of CO_2 emissions, and economic freedom on CO_2 emissions in Europe: A spatial econometrics approach. *Environmental Science and Pollution Research, 29(46), 63782–63798. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20179-0*

Xie, Q., et al (2020). How does foreign direct investment affect CO_2 emissions in emerging countries? New findings from a nonlinear panel analysis. *Journal of Cleaner Production, 249, 119422. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119422*

Xu, L., Fan, M., Yang, L., & Shao, S. (2021). Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China's city level. *Energy Economics, 99,* 105269. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105269

Yungfeng, Y. F., & Laike, Y. K. (2010). China's foreign trade and climate change: A case study of CO2 emissions. *Energy Policy, 38, 350–356. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.025*