

Energy Efficiency Assessment in 11 Emerging Countries: A Three-Stage DEA-SBM Approach with Undesirable Outputs

Akram Akbari* 

Assistant Professor, Department of Economic Development and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Parviz Mohamadzadeh 

Full Professor, Department of Economic Development and Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

This study evaluates the energy-economic efficiency of 11 emerging countries using a three-stage DEA-SBM approach with undesirable outputs. Gross capital formation, labor force participation, and energy use are considered as inputs, while gross domestic product is treated as the desirable output and carbon dioxide emissions from the energy sector as the undesirable output. In the first stage, initial efficiency scores are estimated using the SBM model. In the second stage, the effects of environmental conditions and statistical noise on input slacks are examined using a stochastic frontier model that incorporates government effectiveness, GDP per capita, urbanization, and the share of renewable energy. In the third stage, efficiency is re-estimated based on adjusted inputs. The findings reveal substantial cross-country heterogeneity in energy efficiency. After controlling for environmental effects, Türkiye, Egypt, and Brazil appear among the most efficient countries, whereas Iran, Vietnam, and South Africa record the lowest efficiency levels. The results also indicate that a higher share of renewable energy reduces excess energy use, suggesting that changes in the energy mix can play an important role in reducing energy inefficiency in the selected countries. Overall, improving energy performance in emerging economies requires more efficient use of inputs, wider deployment of renewable energy, and faster technological transformation.

Keywords: Energy efficiency; Three-stage DEA; SBM with undesirable outputs; Stochastic frontier analysis; Emerging countries.

JEL Classification: C23, C61, O13, Q43, Q53

Received:

Accepted:

ISSN:

eISSN:

* Corresponding Author: akbari.a@tabrizu.ac.ir

How to Cite: Akbari, A. & Mohamadzadeh, P. (2026). Energy Efficiency Assessment in 11 Emerging Countries: A Three-Stage DEA-SBM Approach with Undesirable Outputs.



ارزیابی کارایی انرژی در ۱۱ کشور نوظهور: رویکرد سه مرحله‌ای DEA-SBM با خروجی نامطلوب

استادیار گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اکرم اکبری *

استاد گروه توسعه اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

پرویز محمدزاده

چکیده

این پژوهش کارایی انرژی-اقتصادی ۱۱ کشور نوظهور را با استفاده از رویکرد سه مرحله‌ای DEA-SBM با خروجی نامطلوب ارزیابی می‌کند. در این چارچوب، تشکیل سرمایه ناخالص، نرخ مشارکت نیروی کار و مصرف انرژی به عنوان نهاده‌ها، تولید ناخالص داخلی به عنوان خروجی مطلوب و انتشار دی‌اکسید کربن بخش انرژی به عنوان خروجی نامطلوب در نظر گرفته شدند. در مرحله نخست، کارایی اولیه کشورها با مدل SBM برآورد شد. در مرحله دوم، اثر شرایط محیطی و اختلالات تصادفی بر مازاد نهاده‌ها با استفاده از مدل مرز تصادفی و متغیرهای اثربخشی دولت، تولید ناخالص داخلی سرانه، شهرنشینی و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی شد. در مرحله سوم، کارایی بر پایه نهاده‌های تعدیل شده مجدداً محاسبه گردید. نتایج نشان داد کارایی انرژی در میان کشورهای مورد مطالعه ناهمگن است و پس از تعدیل اثرات محیطی، ترکیه، مصر و برزیل در زمره کاراترین کشورها قرار گرفتند، در حالی که ایران، ویتنام و آفریقای جنوبی پایین‌ترین سطوح کارایی را ثبت کردند. همچنین، افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر با کاهش مازاد مصرف انرژی همراه بود. این یافته نشان می‌دهد که اصلاح ترکیب انرژی می‌تواند یکی از مسیرهای مهم کاهش ناکارایی انرژی در کشورهای مورد بررسی باشد. به طور کلی، بهبود عملکرد انرژی در کشورهای نوظهور مستلزم ارتقای کارایی نهاده‌ها، گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر و تسریع در تحول فناورانه است.

کلیدواژه‌ها: کارایی انرژی، DEA سه مرحله‌ای، مدل SBM با خروجی نامطلوب، مرز تصادفی، کشورهای نوظهور.

طبقه‌بندی JEL: C23, C61, O13, Q43, Q53

۱. مقدمه

رشد اقتصادی پایدار در جهان امروز بیش از هر زمان دیگری به نحوه استفاده از انرژی وابسته است. انرژی، زیرساخت بنیادین فعالیت‌های اقتصادی در بخش‌هایی مانند صنعت، حمل‌ونقل، خدمات و فناوری اطلاعات است؛ اما در عین حال یکی از مهم‌ترین منشأهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و فشار بر محیط‌زیست نیز به شمار می‌رود. از این رو، کارایی انرژی صرفاً یک شاخص فنی یا مهندسی نیست، بلکه مفهومی چندبعدی است که هم‌زمان با رقابت‌پذیری اقتصادی، امنیت انرژی، کاهش هزینه‌های تولید، کنترل انتشار آلاینده‌ها و تحقق توسعه پایدار پیوند دارد (راسخی و قنبرتبار، ۱۴۰۲؛ Ang, 2006؛ Taylor, et al., 2010). آژانس بین‌المللی انرژی^۱ (۲۰۲۴) نیز کارایی انرژی را یکی از ارکان اصلی گذارهای انرژی امن، مقرون‌به‌صرفه و فراگیر می‌داند و بر ضرورت شتاب‌بخشی به بهبود کارایی انرژی برای دستیابی به مسیرهای خالص صفر تأکید می‌کند.

اهمیت کارایی انرژی زمانی برجسته‌تر می‌شود که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند. استفاده کارآمدتر از انرژی می‌تواند از طریق کاهش هزینه‌ها و افزایش بازده نهاده‌ها، رشد اقتصادی و تاب‌آوری رقابتی را تقویت کند و در عین حال، شدت انتشار دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. گزارش‌های بین‌المللی مرتبط با SDG7^۲ و ادبیات تجربی این حوزه نشان می‌دهد که بهبود کارایی انرژی از در دسترس‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین مسیرها برای هم‌سوسازی رشد اقتصادی، امنیت انرژی و کاهش انتشار است (Trotta, 2020; International Energy Agency, et al, 2020; Su, 2023; Edzeah & Opoku, 2024). بنابراین، در ادبیات جدید توسعه پایدار، کارایی انرژی دیگر یک متغیر فرعی نیست، بلکه یکی از پیشران‌های کلیدی توسعه اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی محسوب می‌شود.

با وجود این، مسیر جهانی انرژی هنوز با چالش‌های ساختاری عمیق روبه‌روست. اگرچه شواهد نشان می‌دهد که توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند رشد اقتصادی را تقویت و انتشار کربن را کاهش دهد (Saidi & Omri, 2020)، اما ساختار مصرف انرژی جهان هنوز وابستگی بالایی به سوخت‌های فسیلی دارد (Energy Institute, 2024). این وابستگی به‌ویژه در اقتصادهای نوظهور و در حال توسعه اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا این

1. International Energy Agency: IEA

2. Sustainable Development Goal 7

کشورها از یک سو برای حفظ رشد اقتصادی و صنعتی شدن به انرژی نیاز دارند و از سوی دیگر با الزام کنترل شدت انرژی و کاهش پیامدهای زیست محیطی مواجه‌اند. در چنین شرایطی، مسئله اصلی صرفاً میزان مصرف انرژی نیست، بلکه کیفیت استفاده از انرژی و توان اقتصادها در تبدیل نهاده‌های سرمایه، نیروی کار و انرژی به ستاده مطلوب همراه با مهار ستاده نامطلوب است.

در ادبیات علمی، سنجش کارایی انرژی از شاخص‌های ساده و تک‌عاملی به سمت رویکردهای کل‌عامل و چندبعدی حرکت کرده است. شاخص‌هایی مانند شدت انرژی یا بهره‌وری انرژی، اگرچه در مطالعات اولیه بسیار پرکاربرد بوده‌اند، اما به دلیل نادیده گرفتن جانشینی عوامل، ناهمگنی نهاده‌ها و هزینه‌های زیست محیطی، نمی‌توانند تصویر دقیقی از کارایی ارائه دهند (Patterson, 1996; Cornillie & Fankhauser, 2004; Ang, 2006; Stern, 2012). از این رو، استفاده از رویکردهایی که بتوانند چندین نهاده، خروجی مطلوب و خروجی نامطلوب را به صورت هم‌زمان در نظر بگیرند، برای ارزیابی کارایی انرژی ضروری است.

مرور مطالعات موجود نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های مهم در سنجش کارایی انرژی، چند خلأ قابل توجه همچنان باقی است. نخست، بخش قابل توجهی از مطالعات بر کشورهای توسعه یافته یا گروه‌های خاصی از اقتصادها تمرکز داشته‌اند، در حالی که اقتصادهای نوظهور و در حال توسعه به دلیل مواجهه هم‌زمان با نیاز به رشد، صنعتی شدن و فشارهای اقلیمی، نیازمند بررسی مستقل هستند. دوم، بسیاری از پژوهش‌ها صرفاً بر کارایی اولیه متمرکز بوده و آن را بر پایه داده‌های تعدیل نشده اجرا کرده‌اند و اثر شرایط محیطی و نویز آماری را از ناکارایی واقعی تفکیک نکرده‌اند. سوم، در بخشی از ادبیات، پیوند میان شرایط محیطی، کارایی تعدیل شده و شکاف عملکردی کشورها به صورت منسجم بررسی نشده است. این خلأها به ویژه برای کشورهایی اهمیت دارد که با شدت انرژی بالا، چالش‌های نهادی و وابستگی بیشتر به سوخت‌های فسیلی مواجه‌اند.

پژوهش حاضر در پاسخ به این خلأها، به ارزیابی کارایی انرژی در ۱۱ کشور منتخب نوظهور و در حال توسعه^۱ می‌پردازد و برای این منظور از چارچوب سه مرحله‌ای DEA-

۱. در این مطالعه، منظور از کشورهای نوظهور، اقتصادهای منتخب از گروه کلان «اقتصادهای نوظهور و در حال توسعه (EMDES)» بر اساس طبقه‌بندی صندوق بین‌المللی پول است. انتخاب این کشورها (از جمله مصر و مراکش در کنار چین و هند) به این دلیل است که همگی در مسیر گذار انرژی با چالش‌های ساختاری مشابهی (تأمین همزمان رشد،

SBM با خروجی نامطلوب استفاده می‌کند. در مرحله نخست، کارایی فنی با استفاده از مدل SBM-VRS با خروجی نامطلوب برآورد می‌شود تا توان کشورها در تبدیل نهاده‌های سرمایه، نیروی کار و انرژی به GDP همراه با کنترل انتشار CO_2 سنجیده شود. در مرحله دوم، برای تفکیک اثر شرایط محیطی از ناکارایی مدیریتی، اسلک‌های نهاده‌ای با استفاده از مدل مرز تصادفی و متغیرهای محیطی تحلیل می‌شوند. در مرحله سوم، کارایی بر پایه نهاده‌های تعدیل‌شده مجدداً برآورد می‌شود تا تصویری خالص‌تر از عملکرد واقعی کشورها به دست آید.

نوآوری این پژوهش در دو سطح قابل طرح است. نخست، مطالعه حاضر از رویکرد سه‌مرحله‌ای DEA-SBM با خروجی نامطلوب برای ارزیابی کارایی انرژی-اقتصادی در ۱۱ کشور نوظهور و در حال توسعه استفاده می‌کند؛ رویکردی که امکان تفکیک کارایی اولیه از کارایی تعدیل‌شده را فراهم می‌سازد. دوم، با تمرکز بر کشورهای نوظهور و در حال توسعه، این مطالعه به گروهی از اقتصادها می‌پردازد که از یک‌سو با ضرورت رشد و صنعتی‌شدن مواجه‌اند و از سوی دیگر تحت فشار کربن‌زدایی و گذار انرژی قرار دارند. از این رو، یافته‌های آن می‌تواند هم از نظر روش‌شناختی و هم از نظر سیاست‌گذاری، برای ادبیات کارایی انرژی و بهره‌وری سبز مفید باشد.

در ادامه، ابتدا مبانی نظری و پیشینه پژوهش مرور می‌شود. سپس روش‌شناسی تحقیق، متغیرها و داده‌ها تشریح می‌گردد. در بخش بعد، نتایج مربوط به کارایی اولیه، اثر متغیرهای محیطی و کارایی تعدیل‌شده ارائه و تحلیل می‌شود. در پایان نیز جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و توصیه‌های سیاستی ارائه خواهد شد.

۲. ادبیات تحقیق

در این بخش، مبانی نظری و پیشینه پژوهش در حوزه کارایی انرژی با تمرکز بر مطالعات مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها، مدل‌های اسلک‌محور و رویکردهای سه‌مرحله‌ای بررسی می‌شود. مرور این مطالعات، ضمن روشن‌ساختن مسیر تحول ادبیات موضوع، به شناسایی متغیرهای پرکاربرد، روش‌های غالب و خلأهای پژوهشی موجود کمک می‌کند.

در جدول زیر، خلاصه‌ای از مهم‌ترین مطالعات مرتبط به همراه جامعه آماری، روش‌شناسی، متغیرها و نتایج اصلی ارائه شده است.

۱-۲. مبانی نظری

در ادبیات کارایی انرژی، سنجش عملکرد انرژی ابتدا بر شاخص‌های ساده‌ای مانند شدت انرژی یا بهره‌وری انرژی متکی بود. این شاخص‌ها اگرچه تصویری اولیه از نسبت مصرف انرژی به تولید یا تولید به مصرف انرژی ارائه می‌کنند، اما به دلیل ماهیت تک‌عاملی خود نمی‌توانند تعامل میان انرژی، سرمایه، نیروی کار و خروجی‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان نشان دهند. از این رو، در مطالعات جدید، مفهوم کارایی کل عوامل انرژی (TFEE)^۱ مطرح شده است. هو و وانگ^۲ (۲۰۰۶) کارایی کل عوامل انرژی را به‌عنوان نسبت نهاده بهینه انرژی به نهاده واقعی انرژی، با ثابت فرض کردن سایر عوامل، معرفی کردند. این رویکرد نسبت به شاخص‌های ساده مزیت دارد، زیرا انرژی را در کنار سایر نهاده‌های تولید بررسی می‌کند و امکان تحلیل دقیق‌تری از نقش انرژی در فرآیند تولید فراهم می‌سازد.

در چارچوب نظری تولید، انرژی در کنار سرمایه و نیروی کار یکی از نهاده‌های مهم فعالیت اقتصادی است. بنابراین، ارزیابی کارایی انرژی زمانی معتبرتر خواهد بود که فرآیند تولید به‌صورت چندنهاده‌ای و چندستاده‌ای دیده شود. بر این اساس، اگر کشوری با سطح مشخصی از سرمایه، نیروی کار و انرژی بتواند تولید بیشتری ایجاد کند و در عین حال انتشار کربن کمتری داشته باشد، از منظر کارایی انرژی-اقتصادی عملکرد مطلوب‌تری دارد. در مقابل، مصرف بالای انرژی همراه با تولید پایین‌تر یا انتشار بیشتر، نشان‌دهنده فاصله از مرز کارایی است.

در میان روش‌های سنجش TFEE، تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^۳ جایگاه برجسته‌ای یافته است. این روش به دلیل توانایی در لحاظ هم‌زمان چندین نهاده و ستاده، عدم نیاز به فرض تابع تولید مشخص و قابلیت مقایسه واحدهای تصمیم‌گیرنده ناهمگون، در مطالعات بین‌کشوری کارایی انرژی بسیار پرکاربرد است (Cooper & et al., 2006; Mardani, et al., 2017; Yu & He, 2020). برخلاف روش‌های پارامتریک که نیازمند تعیین شکل تابع

1. Total Factor Energy Efficiency (TFEE)

2. Hu, J.L. & Wang S.C.

3. Data Envelopment Analysis (DEA)

تولید هستند، DEA مرز کارایی را بر پایه داده‌های مشاهده‌شده می‌سازد و عملکرد هر واحد را نسبت به بهترین عملکردهای موجود مقایسه می‌کند.

با این حال، در مطالعات انرژی و محیط‌زیست، استفاده از مدل‌های متعارف DEA کافی نیست؛ زیرا تولید اقتصادی معمولاً با خروجی‌های نامطلوبی مانند انتشار دی‌اکسید کربن همراه است. اگر این خروجی‌های نامطلوب در مدل لحاظ نشوند، ممکن است کشوری به دلیل تولید بالاتر، کاراتر ارزیابی شود، در حالی که هزینه زیست‌محیطی بیشتری ایجاد کرده است. از این رو، وارد کردن خروجی نامطلوب در مدل‌های DEA برای تحلیل واقع‌بینانه کارایی انرژی ضروری است.

در این زمینه، مدل SBM^1 که توسط تون^۲ (۲۰۰۱) توسعه یافت، نسبت به مدل‌های شعاعی متعارف مزیت دارد؛ زیرا مازاد نهاده‌ها و کمبود ستاده‌ها یا همان اسلک‌ها^۳ را به‌طور مستقیم در محاسبه کارایی لحاظ می‌کند. این ویژگی در مطالعات انرژی اهمیت زیادی دارد، زیرا ناکارایی ممکن است صرفاً به صورت کاهش متناسب همه نهاده‌ها ظاهر نشود، بلکه در قالب مازاد مصرف انرژی، مازاد سرمایه، مازاد نیروی کار یا افزایش خروجی نامطلوب بروز کند. کاربرد نسخه‌های دارای خروجی نامطلوب SBM در مطالعات انرژی نشان داده است که بدون لحاظ انتشار کربن و سایر پیامدهای زیست‌محیطی، ارزیابی کارایی انرژی می‌تواند دچار تورش شود (Apergis, et al., 2015). بنابراین، در تحلیل اقتصادهای انرژی بر و کربن‌محور، استفاده از $DEA-SBM$ با خروجی نامطلوب رویکردی نوین، علمی‌تر و واقع‌بینانه‌تر به شمار می‌رود.

- منطق رویکرد سه‌مرحله‌ای $DEA-SFA$

با وجود مزیت‌های روش DEA ، یکی از نقدهای مهم وارد بر برآوردهای متعارف آن، این است که کارایی اولیه حاصل از این روش می‌تواند تحت تأثیر شرایط محیطی و اختلالات تصادفی قرار گیرد. به بیان دیگر، همه تفاوت‌های مشاهده‌شده در کارایی را نمی‌توان به عملکرد مدیریتی یا فنی نسبت داد؛ بخشی از این تفاوت‌ها ممکن است محصول ساختارهای بیرونی مانند توسعه اقتصادی، کیفیت نهادی، شهرنشینی یا ساختار انرژی باشد.

1. Slack-Based Measure

2. Tone, K.

۳. اسلک (Slack) یعنی مقدار اضافه نهاده یا کمبود ستاده نسبت به حالت کارا. به بیان دیگر، اگر یک کشور بیشتر از مقدار لازم انرژی یا سرمایه مصرف کند، این بخش مازاد نهاده یا اسلک است.

برای رفع این مسئله، فرید^۱ و همکاران (۲۰۰۲) رویکرد سه مرحله‌ای DEA را پیشنهاد کردند. در مرحله نخست، کارایی اولیه واحدهای تصمیم‌گیرنده با استفاده از DEA برآورد می‌شود. در مرحله دوم، اسلک‌های نهاده‌ای به‌عنوان متغیر وابسته وارد مدل مرز تصادفی می‌شوند تا اثر متغیرهای محیطی، ناکارایی و نویز آماری از یکدیگر تفکیک شود. در مرحله سوم، نهاده‌ها بر اساس نتایج مرحله دوم تعدیل می‌شوند و مدل DEA بار دیگر اجرا می‌شود. به این ترتیب، امتیاز کارایی نهایی کمتر تحت تأثیر شرایط بیرونی و اختلالات تصادفی قرار می‌گیرد و تصویر دقیق‌تری از عملکرد واقعی واحدهای مورد بررسی ارائه می‌کند.

استفاده از این رویکرد در مطالعات انرژی نیز گسترش یافته است. برای مثال، ژانگ و چن^۲ (۲۰۲۲) نشان دادند که مدل سه مرحله‌ای SBM-DEA می‌تواند در ارزیابی کارایی انرژی، اثر شرایط محیطی را از ناکارایی واقعی تفکیک کند و تصویر دقیق‌تری از عملکرد کشورها یا مناطق ارائه دهد. بنابراین، در مطالعه حاضر نیز به دلیل ناهمگنی ساختاری اقتصادهای منتخب نوظهور و در حال توسعه، استفاده از چارچوب سه مرحله‌ای DEA-SBM با خروجی نامطلوب از نظر تئوری و روش‌شناختی مناسب است.

1. Fried, H.O., Lovell, C. A. K., Schmidt, S. S., & Yaisawarng, S.
2. Zhang, C. & Chen, P.

جدول ۱. مشخصات و نتایج کلیدی مطالعات داخلی و خارجی

نویسندگان (سال)	عنوان فارسی مطالعه	جامعه آماری	روش‌شناسی	متغیرهای ورودی و خروجی	نتایج کلیدی
Pastor & Lovell, 2005	شاخص جهانی مالم کوئیسٹ بهره‌وری	مطالعه روش‌شناختی؛ به‌همراه یک کاربرد تجربی روی ۹۳ بنگاه تولید برق آمریکا در چهار سال ۱۹۷۷، ۱۹۸۲، ۱۹۸۷ و ۱۹۹۲.	معرفی شاخص جهانی مالم کوئیسٹ بهره‌وری	ورودی‌ها شامل: نیروی کار، سوخت؛ خروجی نیز تولید برق خالص	نتایج روش‌شناختی نشان داد شاخص متعارف مالم کوئیسٹ دایره‌ای نیست و مؤلفه‌های بین‌دوره‌ای آن می‌توانند سیگنال‌های متناقض درباره تغییر بهره‌وری بدهند، در حالی‌که شاخص جهانی پیشنهادی دایره‌ای است و یک روایت یگانه از تغییر بهره‌وری ارائه می‌کند. در کاربرد تجربی برق آمریکا، شاخص جهانی M_G^C افت بهره‌وری را از ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۲ برابر ۰/۶۸۵، از ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۷ برابر ۱/۰۶۴، از ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۲ برابر ۱/۰۳۹ و بهره‌وری تجمعی ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۲ برابر ۰/۷۵۷ نشان داد؛ یعنی بهره‌وری تجمعی در ۱۹۹۲ حدود ۲۵ درصد کمتر از ۱۹۷۷ بود. جزء تغییر کارایی EC^C در کل دوره ۱/۱۷۶ بود، یعنی حدود ۱۸ درصد بهبود کارایی رخ داده بود، اما جزء تغییر بهترین عملکرد BPC^C برابر ۰/۶۴۴ بود که نشان‌دهنده پسرفت فناوری/بدتر شدن بنچمارک است. در مقابل، شاخص متعارف M^C بهره‌وری تجمعی را ۰/۵۹۲ و یکی از اجزای آن M_E^C حتی ۱/۳۳۳ و جزء دیگر M_{E+1}^C را ۰/۲۶۳ گزارش کرد؛ این اختلاف شدید نشان می‌دهد شاخص متعارف روایت‌های متناقض می‌سازد.
Oh, 2010	شاخص جهانی مالم کوئیسٹ- لیونبرگر	۲۶ کشور OECD، ۱۹۹۰-۲۰۰۳	GML مبتنی بر global PPS و DDF	ورودی‌ها: نیروی کار، سرمایه، مصرف تجاری انرژی خروجی مطلوب: GDP خروجی‌های نامطلوب:	نتایج نشان داد که شاخص جهانی مالم کوئیسٹ-لیونبرگر (GML) نسبت به شاخص‌های متعارف، برآورد متفاوت‌تری از رشد بهره‌وری ارائه می‌کند، زیرا آثار منفی انتشار CO_2 و SO_x را نیز در نظر می‌گیرد. رشد بهره‌وری در ۲۶ کشور OECD طی ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۳ عمدتاً ناشی از پیشرفت فناوری بوده است. همچنین سوئیس به‌عنوان یک کشور سبز، سوئد به‌عنوان یک کشور نوآور، و

					کشورهایی مانند کانادا، ایتالیا، کره، پرتغال، اسپانیا و آمریکا در گروه کشورهای زرد شناسایی شدند. این مطالعه همچنین نشان داد که شاخص GML دارای خاصیت دایره‌ای بوده و از مشکل عدم امکان حل مدل میراست.
صادقی و همکاران، ۱۳۹۱	بررسی رابطه کوزنتسی در کشورهای اسلامی منتخب با تأکید بر کارایی محیط‌زیست	کشورهای اسلامی منتخب	DEA + تحلیل کارایی محیط‌زیستی و داده‌های تابلویی	سنجش کارایی انرژی با لحاظ GDP و CO ₂	نتایج نشان می‌دهد که هند، ترکیه، مصر و ایران بالاترین نمره‌های کارایی را داشته‌اند و رابطه کوزنتس زیست‌محیطی تأیید نشده است
محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۳	سنجش کارایی اقتصاد دانش‌بنیان در کشورهای منتخب منطقه منا: تحلیل پوششی داده‌ها	کشورهای منتخب منطقه منا، ۲۰۰۰-۲۰۱۳	تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)	ورودی و خروجی‌ها: شاخص‌های منتخب اقتصاد دانش‌بنیان بر پایه چارچوب‌های OECD، APEC و WBI در چهار بعد: انباشت دانش، تولید دانش، انتشار/توزیع دانش و کاربرد دانش.	نتایج نشان داد در بعد کسب/انباشت دانش، تحت فرض بازده ثابت به مقیاس، اردن بالاترین کارایی را داشته و روی مرز کارا قرار گرفته است؛ و تحت بازده متغیر به مقیاس، الجزایر و اردن کارا بوده‌اند. در بعد تولید و توزیع دانش، الجزایر، مراکش و یمن بهترین عملکرد را داشته‌اند. در بعد کاربرد دانش نیز الجزایر بالاترین کارایی را به دست آورده است. بنابراین کارایی اقتصادی دانش‌بنیان در کشورهای منتخب منا ناهمگون است و مزیت کشورها در ابعاد مختلف اقتصاد دانش‌بنیان یکسان نیست. لذا، سیاست‌های توسعه دانش، تولید دانش، انتشار دانش و کاربرد دانش به‌صورت بُعدمحور و کشورمحور طراحی شود.
محمدزاده و نجاربادوق قره‌چی، ۱۳۹۳	بررسی تأثیر ICT بر کارایی تولیدی کشورهای در حال توسعه منتخب	کشورهای منتخب در حال توسعه، ۱۹۹۵-۲۰۰۸	تحلیل مرزی تصادفی (SFA)	ورودی و خروجی‌ها: در چارچوب تابع تولید کلان کشورها، نهاده‌های تولیدی اقتصاد مبنای سنجش کارایی قرار گرفته و	نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیشتر شاخص‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات اثر مثبت و معناداری بر کارایی تولیدی کشورهای نمونه منتخب دارند. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد ICT می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اتلاف منابع و بهبود کارایی تولیدی ایفا کند. سرمایه‌گذاری در ICT می‌تواند برای کشورهای در حال توسعه ابزاری برای ارتقای کارایی تولیدی و بهبود عملکرد کلان اقتصادی

				شاخص‌های مختلف فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) به عنوان متغیرهای اثرگذار بر کارایی باشد.
بهبودی و همکاران، ۱۳۹۴	بررسی کارایی انتشار دی اکسید کربن بر مبنای مصرف انرژی	کشورهای گروه دی هشت (D8) طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳	تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)	ورودی‌ها: انرژی، سرمایه، کار
Suzuki & Nijkamp, 2016	ارزیابی کارایی انرژی-محیط زیست-اقتصاد در APEC، EU و ASEAN	۴۷ کشور شامل ۲۷ کشور اتحادیه اروپا و ۲۰ کشور APEC/ASEAN، ۲۰۰۳-۲۰۱۲	Target-Oriented DFM + Fixed Factor DEA + Super-efficiency	ورودی‌ها: مصرف انرژی، جمعیت؛ خروجی‌ها: GDP و CO ₂
Arabi, Munisamy & Emrouznejad, 2015	سنجه اسلک مبنای شاخص مالم کوئیس-لیونیرگر در حضور خروجی نامطلوب	مطالعه روش شناختی و کاربرد آن در نیروگاه بخار	SBM-MLI with undesirable outputs	ورودی‌ها: نهاده‌های تولید خروجی مطلوب: ستاده‌های مطلوب خروجی نامطلوب: محصولات جانبی نامطلوب/
				نتایج نشان داد سطح کارایی انتشار CO ₂ مبتنی بر مصرف انرژی در کشورهای گروه D8 طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ ناهمگن است. به طور متوسط، کشورها برای افزایش کارایی و کاهش فشار زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی، نیازمند توجه بیشتر به بهبود کارایی فنی و کاهش اتلاف انرژی هستند.
				نتایج نشان داد که کشورهای اتحادیه اروپا به طور متوسط کاراتر از کشورهای APEC و ASEAN هستند و لوکزامبورگ، قبرس، ایرلند و برونی به عنوان واحدهای فوق کارا شناخته شدند. شکاف کارایی EU و A&A پس از ۲۰۰۶ افزایش یافت و در ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ معنادار شد. همچنین مدل TO-DFM-FF نسبت به مدل‌های CCR و DFM برنامه‌های بهبود واقع بینانه تر و قابل اجرایی تری ارائه داد، زیرا جمعیت را به عنوان عامل ثابت در نظر گرفت و سطح هدف کارایی را به صورت مرحله‌ای تعریف کرد. برای مثال، برای ژاپن ۲۰۱۲ دستیابی به کارایی ۰/۸۵ با کاهش ۱۲/۵ درصد در مصرف انرژی و افزایش ۱۲/۵ درصد در GDP ممکن بود.
				نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص مالم کوئیس استاندارد برای سنجش تغییرات بهره‌وری در حضور خروجی‌های نامطلوب مناسب نیست و در این شرایط باید از شاخص مالم کوئیس-لیونیرگر استفاده شود. نویسندگان با ارائه یک مدل DEA مبتنی بر سنجه اسلک مبنای و یک الگوریتم جدید، مشکل رایج عدم امکان حل مدل (infeasibility) را در مقایسه‌های بین دوره‌ای MLI

				برطرف کردند. همچنین مدل پیشنهادی با انتخاب بهترین جهت درون‌زا، افزایش خروجی مطلوب و کاهش خروجی نامطلوب را به‌طور همزمان در نظر می‌گیرد و در کاربرد واقعی نیروگاه‌های بخار نیز قابلیت عملی آن تأیید شد.
Emrouznejad & Yang, 2016	چارچوبی برای اندازه‌گیری GML با CO ₂ در صنایع تولیدی چین	صنایع تولیدی دو رقیمی چین، ۲۰۰۴-۲۰۱۲	DEA + GMLPI با CO ₂	ورودی‌ها: دارایی، نیروی کار، انرژی؛ خروجی مطلوب: ستاده صنعتی؛ خروجی نامطلوب: CO ₂
Zhao et al., 2018	کارایی کل عامل انرژی در کشورهای BRI بر پایه DEA سه مرحله‌ای	۳۵ کشور BRI، سال ۲۰۱۵	Three-stage DEA	ورودی‌ها: انرژی، سرمایه، کار، کربن؛ خروجی: GDP؛ متغیرهای محیطی: ساختار انرژی، تجارت، صنعتی شدن
Wang, Le & Nguyen, 2019	ارزیابی بهبود کارایی انرژی در ۲۵ کشور	۲۵ کشور، ۲۰۱۰-۲۰۱۷	SBM-DEA + MPI	کشورهای توسعه‌یافته توازن بهتری میان GDP و CO ₂ دارند؛ هند و چین شدت انرژی را بهبود دادند ولی همچنان از ضعیف‌ترین‌ها باقی ماندند
Wang et al., 2020	ارزیابی بوم‌کارایی برخی کشورهای اروپایی با-SBM DEA	۱۷ کشور اروپایی، ۲۰۱۳-۲۰۱۷	SBM-DEA + Catch-up + Frontier-shift + MPI	کارایی بوم‌شناختی یا اکوکارایی به معنای کارایی در استفاده از منابع است. نتایج تجربی نشان داد که ۱۷ کشور مورد بررسی در مجموع طی دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ از اکوکارایی کافی برخوردار نبوده‌اند؛ بنابراین، برای بهبود اکوکارایی آن‌ها باید تلاش بیشتری صورت گیرد.
ابراهیمی سالاری و همکاران، ۱۳۹۹	ارزیابی کارایی زیست‌محیطی بخش	۱۵ استان ایران، ۱۳۹۷	DEA+تابع فاصله جهت‌دار	میانگین کارایی محیط‌زیستی در مدل DEA ۵۶۸/۰ و در مدل DDF برابر ۴۲۷/۰ بود؛ تهران و کرمان کاراترین استان‌ها بودند

	صنعت استان‌های ایران در مصرف گاز طبیعی			خروجی مطلوب: ارزش افزوده؛ خروجی نامطلوب: CO ₂	
Zhang & Chen, 2022	کاربرد مدل سه مرحله‌ای SBM- DEA برای ارزیابی کارایی انرژی و عوامل اثرگذار در کشورهای RCEP	۱۳ کشور RCEP ، ۲۰۰۰-۲۰۱۵	Three-stage SBM-DEA	ورودی‌ها: سرمایه، نیروی کار، مصرف انرژی. خروجی مطلوب: GDP خروجی نامطلوب: CO ₂ متغیرهای محیطی: مقررات زیست محیطی، توسعه اقتصادی، نوآوری فنی.	نتایج نشان داد که پس از کنترل اثر متغیرهای محیطی و نویز آماری، مقادیر کارایی انرژی و رتبه‌بندی واحدهای مورد بررسی تغییر می‌کند و بخشی از کارایی اولیه بیش‌برآورد شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که رویکرد سه مرحله‌ای SBM-DEA تصویر دقیق‌تری از کارایی انرژی در کشورهای RCEP ارائه می‌دهد.
Zhou & Xu, 2022	ارزیابی کارایی انرژی اعضای RCEP: مدل سه مرحله‌ای SBM با خروجی نامطلوب	اعضای RCEP	Three-stage SBM-DEA with undesirable outputs	ورودی‌ها: سرمایه، نیروی کار، مصرف انرژی خروجی مطلوب: GDP خروجی نامطلوب: CO ₂ متغیرهای محیطی: نفوذ دولت، سطح توسعه اقتصادی، سطح توسعه شهری	نتایج تجربی نشان می‌دهد که کارایی انرژی چین، ژاپن و استرالیا برابر با ۱ است و این کشورها در مرز کارایی قرار دارند، در حالی که ویتنام با مقدار ۰/۱۳۶ پایین‌ترین سطح کارایی انرژی را دارد. همچنین شاخص تغییر پیشرفت فناوری در چین برابر ۱/۰۱۳ است که از سایر کشورها بالاتر است. یافته‌های این پژوهش به درک روند تغییرات کارایی انرژی در کشورهای مختلف کمک می‌کند، امکان تبدیل مزیت‌های کارایی انرژی برخی اعضا به مزیت مشترک برای همه اعضای RCEP را فراهم می‌سازد، و ظرفیت حکمرانی جامع انرژی را در کشورهای عضو ارتقا می‌دهد.
Yan et al., 2022	ارزیابی کارایی انرژی استان‌های کمربند و راه تحت قیود کربنی	۱۷ استان چین، ۲۰۱۵-۲۰۱۹	Super- efficient SBM + Malmquist	خروجی مطلوب: GDP؛ خروجی نامطلوب: CO ₂	منطقه Maritime Silk Road کارا تر از Silk Road Economic Belt بود؛ عامل اصلی ضعف کمربند زمینی، کارایی فنی پایین و عامل اصلی بهبود منطقه دریایی، پیشرفت فناوری بود
Wang et al., 2023	کارایی اقتصادی و	۲۰ کشور OECD ،	DEA-SBM + DEA	ورودی‌ها: نیروی کار،	در بعد اقتصادی، استرالیا، بلژیک، نروژ، بریتانیا، آمریکا کارا بودند؛ در بعد

	زیست‌محیطی استفاده از انرژی تجدیدپذیر در OECD	۲۰۱۵-۲۰۲۰	Undesirable Output	سرمایه، ظرفیت تجدیدپذیر، سهم تجدیدپذیر؛ خروجی‌های مطلوب: GDP و کل تولید انرژی؛ خروجی نامطلوب: CO ₂	زیست‌محیطی، بلژیک، فرانسه، سوئد، بریتانیا و آمریکا کارا شدند
Li, Wu & Song, 2023	تحلیل تفاوت‌های منطقه‌ای کارایی انرژی سبز در کشورهای BRI	۵۸ کشور BRI، ۲۰۱۲-۲۰۲۱	Super- efficiency DEA + Malmquist + Tobit	ورودی‌ها: نیروی کار، سرمایه، مصرف انرژی خروجی مطلوب: GDP خروجی نامطلوب: CO ₂ متغیرهای محیطی: قدرت اقتصادی، ساختار مصرف انرژی، گشودگی منطقه‌ای، ساختار صنعتی، هزینه‌های تحقیق و توسعه	نتایج نشان داد که کارایی انرژی سبز ۵۸ کشور واقع در منطقه کمربند و راه طی دوره ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ در مجموع پایین بوده و میانگین آن حدود ۰/۶۲ است. اختلاف میان کشورها زیاد بود؛ به‌طوری که بوتان با میانگین ۰/۰۷ پایین‌ترین و روسیه با میانگین ۱/۶۷ بالاترین کارایی را داشتند. همچنین فقط ۱۰ کشور به کارایی کامل DEA رسیدند. در سطح منطقه‌ای، غرب آسیا بالاترین کارایی را داشت. تحلیل پویای مال‌کوئیس‌ت نشان داد که تغییرات کارایی سبز با نوسان خفیف همراه بوده و پیشرفت فناوری نقش مهمی در بهره‌وری کل عوامل ایفا کرده است. در نهایت، مدل توییت نشان داد که قدرت اقتصادی، ساختار مصرف انرژی، ساختار صنعتی و مخارج R&D اثر مثبت و معنادار، و گشودگی منطقه‌ای اثر منفی و معنادار بر کارایی انرژی سبز دارند.
Tang et al., 2023	مدل نوین سه‌مرحله‌ای DEA برای ارزیابی TFEE در ۳۰ استان و ۸ ناحیه اقتصادی چین	۳۰ استان و ۸ ناحیه اقتصادی چین، ۲۰۰۸-۲۰۱۷	Novel three- stage DEA upgraded by Super-SBM with undesirable output	ورودی‌ها: مصرف انرژی، نیروی کار، استهلاک دارایی‌های ثابت خروجی مطلوب: GDP خروجی نامطلوب: انتشار CO ₂ متغیرهای محیطی: مقررات	نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقررات زیست‌محیطی، توسعه اقتصادی و نوآوری فنی تأثیر معناداری بر کارایی کل عامل انرژی دارند. همچنین پس از حذف اثر متغیرهای محیطی و نوین آماری، مقادیر کارایی کل عامل انرژی و رتبه‌بندی استان‌های مختلف و هشت ناحیه اقتصادی جامع چین به‌طور معنی‌داری تغییر می‌کند. کارایی انرژی در هشت ناحیه اقتصادی جامع، روندی نزولی از شرق به مرکز و سپس غرب را نشان می‌دهد و شکاف میان این مناطق نیز در حال گسترش است.

	زیست محیطی، توسعه اقتصادی، نوآوری فنی				
تایج نشان داد کارایی انتشار کربن صنعت برق حرارتی چین در دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ به صورت نوسانی رو به بهبود بوده، اما تفاوت‌های استانی و منطقه‌ای آن زیاد است. الگوی فضایی کارایی به صورت شرق بالاتر از مرکز و مرکز بالاتر از غرب مشاهده شد. همچنین پس از حذف اثر عوامل محیطی و نوین تصادفی، مقادیر کارایی در بسیاری از استان‌ها کاهش یافت که نشان می‌دهد برآوردهای اولیه می‌تواند بیش‌برآورد باشد. از نظر عوامل اثرگذار نیز سطح توسعه اقتصادی و مقررات زیست محیطی اثر مثبت، و سهم تولید برق حرارتی و ساختار صنعتی اثر منفی بر کارایی انتشار کربن دارند.	ورودی‌ها: سرمایه، نیروی کار، مصرف انرژی خروجی مطلوب: تولید برق حرارتی خروجی نامطلوب: انتشار CO₂ متغیرهای محیطی: سطح توسعه اقتصادی، سهم تولید برق حرارتی، ساختار صنعتی، سطح مقررات زیست محیطی	Three-stage SBM-DEA with undesired output	۲۹ استان چین، ۲۰۱۴-۲۰۱۹	تکامل فضایی-زمانی کارایی انتشار کربن صنعت برق حرارتی چین	Xu et al., 2023
سال ۲۰۲۱ با ۱۶ مقاله اوج انتشار بود؛ Journal of Cleaner Production بیشترین سهم را داشت؛ نتایج میان کشورهای توسعه یافته و درحال توسعه ناهمگن است	مرور ادبیات مرتبط با کارایی انرژی	PRISMA systematic review	۷۵ مقاله، ۲۰۱۳-۲۰۲۳	مرور نظام‌مند کارایی انرژی در کشورهای درحال توسعه و مسیرهای اقتصاد خالص صفر	Mohamed et al., 2024
برونئی، ژاپن، کره و هنگ کنگ کاراتر و روسیه، چین و ویتنام کم کاراتر بودند؛ چین میانگین ۰.۲۱۱۹ داشت	ورودی‌ها: FDI، کل مصرف انرژی، ظرفیت کل تجدیدپذیر؛ خروجی مطلوب: رشد GDP؛	DEA with undesirable output	۲۱ کشور APEC، ۲۰۱۱-۲۰۲۰	کارایی مصرف انرژی تجدیدپذیر و عوامل مؤثر در کشورهای APEC	Wang et al., 2024

				خروجی نامطلوب: GHG	
Shu et al., 2024	ارزیابی کارایی انرژی در ۱۶۸ اقتصاد با مدل Super-efficiency SBM-DEA	۱۶۸ اقتصاد، ۲۰۰۰-۲۰۱۷	Super-efficiency SBM-DEA	بازتعریف کارایی انرژی در چارچوب توسعه پایدار	کارایی جهانی ابتدا افزایش و سپس، به‌ویژه پس از ۲۰۰۹، کاهش ماندگار داشت؛ خوشه‌بندی جغرافیایی مشهود بود و نابرابری درون‌گروه‌های درآمدی عامل اصلی شکاف‌ها شد
Shah et al., 2024	کارایی انرژی، شکاف فناوری و تعیین‌کننده‌های تغییر بهره‌وری انرژی در G20	کشورهای توسعه‌یافته و درحال توسعه ۱۹۹۵-۲۰۲۰، G20	DEA Super-SBM + Meta-frontier + MLI	چارچوب EE، TGR، MLI	میانگین EE برابر ۰/۸۵۷۷ بود؛ توسعه‌یافته‌ها (۰/۸۹۲۷) از درحال توسعه‌ها (۰/۸۲۹۰) کاراتر بودند؛ TGR توسعه‌یافته‌ها ۰/۹۸۶۹ و درحال توسعه‌ها ۰/۶۸۰۱ بود
Addis, 2025	تحلیل پایداری و کارایی ۴۲ کشور با Super SBM GML	۴۲ کشور، ۱۹۹۵-۲۰۲۲	Super SBM-DEA + GML with undesirable outputs	ورودی‌ها: انرژی، تجدیدپذیر، مصرف انرژی، کار، نوآوری؛ خروجی‌های مطلوب: GDP و HDI؛ خروجی نامطلوب: CO ₂	برزیل کم‌کارترین کشور بود؛ ایرلند، ایتالیا، عربستان و آمریکا امتیازهای نزدیک ۱ داشتند؛ GML اغلب نزدیک ۱ بود
He, Lau & Ng, 2025	مدل سه‌مرحله‌ای SBM-DEA تقویت شده با یادگیری ماشین برای GTFP جهانی	۱۵۰ کشور، ۲۰۱۱-۲۰۲۳	ML-enhanced three-stage SBM-DEA + Global Malmquist	ورودی‌ها: نهاده‌های مرتبط با بهره‌وری کل عوامل سبز در سطح کشورها خروجی مطلوب: ستاده‌های اقتصادی-سبز خروجی نامطلوب: خرابی‌های نامطلوب	نتایج نشان داد که چارچوب پیشنهادی سه‌مرحله‌ای SBM-DEA تقویت شده با یادگیری ماشین، در ۱۲۹ کشور از ۱۵۰ کشور سوگیری ناشی از اثرات بیرونی را به‌طور معنی‌داری کاهش داده است. همچنین عملکرد بهره‌وری کل عوامل سبز در سطح جهان ناهمگون است و میان اقتصادهای توسعه‌یافته و درحال توسعه شکاف آشکاری وجود دارد. از نظر روش‌شناختی نیز مقاله نشان می‌دهد که استفاده از Lasso برای انتخاب عوامل محیطی هر اسلک و LSTM برای برآورد اسلک‌ها، دقت مرحله دوم مدل سه‌مرحله‌ای را به‌طور محسوسی افزایش

				زیست محیطی متغیرهای محیطی: عوامل محیطی منتخب برای هر اسلک با Lasso و تعديل شده با LSTM	می دهد.
Ren, Zhang & Palma, 2025	روندهای کارایی انرژی در کشورهای در حال توسعه: همگرایی یا قطبی شدن؟	۳۸ کشور در حال توسعه، ۲۰۰۰- ۲۰۲۱	شاخص مبتنی بر فاصله برای TFEE + TECH + TECCH + convergence clubs	TFEE و اجزای آن	نتایج نشان داد که TECCH نقش مهم تری در TFEE دارد، هرچند از TECH عقب تر است. همچنین برای TFEE، TECH و TECCH هر دو نوع همگرایی σ و β مشاهده شد. TFEE دارای دو باشگاه همگرایی و TECH و TECCH دارای سه باشگاه همگرایی بودند. در عوامل تعیین کننده، حمایت اعتباری اثر منفی، بدهی اثر مثبت، واردات اثر منفی و صادرات اثر مثبت بر احتمال عضویت در باشگاه کارایی بالاتر داشت. در واقع، شکاف های کارایی انرژی در میان کشورهای در حال توسعه به تدریج در حال کاهش است.
Zheng, Zhan & Ren, 2025	کارایی کاهش انتشار CO ₂ در بخش خودروهای انرژی نو چین	صنعت NEV چین، ۲۰۱۸-۲۰۲۳	Three-stage super-SBM DEA with undesirable outputs	ورودی ها: نیروی کار، سرمایه گذاری در دارایی ثابت، مصرف کل انرژی خروجی مطلوب: تولید خودروهای انرژی نو خروجی نامطلوب: انتشار غیرمستقیم CO ₂ در مرحله بهره برداری متغیرهای محیطی: سطح شه رنشینی، سطح مصرف	نتایج نشان داد که کارایی کاهش انتشار CO ₂ در بخش خودروهای انرژی نو چین طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ روندی صعودی اما با نوسانات شدید داشته و میانگین فوق کارایی آن ۰/۳۵۳ بوده است؛ بنابراین هنوز ظرفیت بزرگی برای بهبود، به ویژه از نظر کارایی مقیاس، وجود دارد. تفاوت های استانی بسیار چشمگیر بود؛ تحلیل SFA نیز نشان داد که شهرنشینی اثر خالص مثبت، مصرف خانوار اثر منفی، و پیشرفت فناوری اثر مثبت بر کارایی کاهش کربن دارد. همچنین تحلیل پویای مال م کوئست حاکی از آن است که رشد بهره وری صنعت NEV در چین از یک چرخه نوآوری-جذب تبعیت می کند؛ به این معنا که پس از جهش فناورانه، دوره ای برای هضم و جذب فناوری لازم است.

				خانوار، سطح فناوری (پننت‌های فعال)	
Lu et al., 2026	ارزیابی سه مرحله‌ای رقابت‌پذیری کم‌کربن خطوط هوایی	۲۰ شرکت هواپیمایی جهانی، ۲۰۱۸-۲۰۲۲	SBM-DDF + GML + Random Forest + cloud model	ورودی‌ها: نهاده‌های عملیاتی شرکت هواپیمایی از جمله اندازه ناوگان و مقیاس اشتغال خروجی مطلوب: RTK خروجی نامطلوب: CO ₂	نتایج نشان داد که رقابت‌پذیری کم‌کربن ۲۰ شرکت هواپیمایی بزرگ جهان طی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ با ناهمگنی شدید بین شرکتی و بین دوره‌ای همراه بوده است. میانگین کارایی در ۲۰۲۰-۲۰۲۱ به‌طور محسوس کاهش یافت و در ۲۰۲۱-۲۰۲۲ بهبود پیدا کرد، اما کاهش مطلق CO ₂ از بهبود نسبی کارایی فنی عقب‌تر بود. تحلیل GML نیز نشان داد که تغییرات بهره‌وری اندک بوده و بیشتر از کارایی مدیریتی و عملیاتی ناشی شده، نه از پیشرفت فناوری؛ در نتیجه، اثر کوتاه‌مدت نوسازی ناوگان بر رقابت‌پذیری کم‌کربن محدود بوده است.
Chaubey, Mohanta & Verma, 2026	سنجش عملکرد و بهره‌وری کشورهای G20 در بخش صنعت با رویکردهای GML-DEA	۱۹ کشور G20 ، ۱۹۹۷-۲۰۱۴	General directional DEA + ML + GML	ورودی‌ها: سرمایه، نیروی کار، برق صنعتی؛ خروجی مطلوب: ارزش افزوده صنعتی؛ خروجی نامطلوب: CO ₂	نتایج نشان داد که در فاصله ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴، فقط ۳۱/۵۸ درصد از کشورهای G20 در مدل CRS و ۴۲/۱۰ درصد در مدل VRS کارا بوده‌اند. در مدل CRS، چین، اندونزی، مکزیک، عربستان سعودی و آمریکا و در مدل VRS، آرژانتین، چین، هند، اندونزی، مکزیک، عربستان سعودی، ترکیه و آمریکا در گروه کشورهای کارا قرار گرفتند. همچنین بخش بزرگی از کشورهای G20 هنوز ظرفیت زیادی برای بهبود کارایی انرژی-زیست‌محیطی دارند. مقایسه شاخص‌های ML و GML نشان داد که در حالی که رشد بهره‌وری در چارچوب ML مثبت بوده، در چارچوب GML کاهش یافته است

منبع: یافته‌های تحقیق

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ادبیات کارایی انرژی از شاخص‌های ساده‌ای مانند شدت انرژی به سمت شاخص‌های کل‌عامل و روش‌های مرزی حرکت کرده است. با این حال، سه خلأ اصلی همچنان قابل مشاهده است. نخست، بخش مهمی از مطالعات اولیه، انرژی را به صورت تک‌نهادی بررسی کرده‌اند و از تعامل انرژی با سرمایه و نیروی کار غفلت کرده‌اند. دوم، برخی مطالعات DEA اگرچه چندنهادی هستند، اما خروجی نامطلوبی مانند CO_2 را وارد مدل نکرده‌اند و در نتیجه، ممکن است کشورهایی را کارا تلقی کنند که رشد اقتصادی بالایی دارند اما هزینه زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد می‌کنند. سوم، بسیاری از مطالعات، کارایی مشاهده‌شده را مستقیماً به عملکرد مدیریتی نسبت داده‌اند، در حالی که شرایط محیطی مانند کیفیت حکمرانی، سطح توسعه اقتصادی، شهرنشینی و ساختار انرژی می‌تواند بر اسلک نهاده‌ها اثر بگذارد. مقاله حاضر با استفاده از رویکرد سه‌مرحله‌ای DEA-SBM با خروجی نامطلوب تلاش می‌کند این سه محدودیت را به صورت همزمان کاهش دهد.

۳. روش‌شناسی تحقیق

۳-۱. مدل DEA

توانایی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMU) برای افزایش خروجی‌ها یا کاهش ورودی‌ها با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی موسوم به تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) ارزیابی می‌شود. همان‌گونه که در رابطه (۱) و (۲) نشان داده شده است، مدل DEA با هدف حداکثرسازی نسبت وزنی ورودی‌ها و خروجی‌های واحدهای تصمیم‌گیرنده منتخب طراحی شده است.

هدف حداکثرسازی به صورت زیر است:

$$\max Z_{pq} = \max \frac{\sum_{i=1}^s u_{im} y_{iq}}{\sum_{j=1}^t v_{jp} y_{jq}} \quad (1)$$

به طوری که:

$$0 \leq \frac{\sum_{i=1}^s u_{ip} y_{iq}}{\sum_{j=1}^t v_{jp} y_{jq}} \leq 1, \quad q = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$u_{jp} \geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, s$$

$$v_{jp} \geq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, t$$

که در آن:

- Z_{pq} کارایی واحد تصمیم‌گیرنده $DMU_q (q = 1, 2, \dots, n)$ است که با استفاده از ترکیب وزنی متناسب به $DMU_p (p = 1, 2, \dots, n)$ ارزیابی می‌شود؛
- n تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده مورد محاسبه است؛
- s تعداد خروجی‌ها؛
- t تعداد ورودی‌ها؛
- u_{ip} وزن متناسب به خروجی i ام ($i = 1, 2, \dots, s$) برای $DMU_p (p = 1, 2, \dots, n)$ است؛
- v_{ip} وزن متناسب به ورودی i ام ($i = 1, 2, \dots, t$) برای $DMU_p (p = 1, 2, \dots, n)$ است؛
- y_{iq} مقدار خروجی i ام ($i = 1, 2, \dots, s$) برای $DMU_q (q = 1, 2, \dots, n)$ است؛
- x_{jq} مقدار ورودی j ام ($j = 1, 2, \dots, t$) برای $DMU_q (q = 1, 2, \dots, n)$ است؛
- ε یک ثابت اعشاری کوچک است.

واحدهای تصمیم‌گیرنده مورد بررسی زمانی از منظر DEA کارا تلقی می‌شوند که امتیاز کارایی، یا مقدار بهینه تابع هدف در مدل (۱)، برابر با ۱ (یا ۱۰۰ درصد) باشد. در غیر این صورت، آن‌ها از دیدگاه DEA ناکارا محسوب می‌شوند.

۲-۳. مدل DEA با خروجی نامطلوب

کوپر^۱ و همکاران (۲۰۰۶) مدل SBM^۲ را بهبود دادند و در فرایند تحلیل کارایی و ناکارایی، مدل DEA با خروجی‌های نامطلوب را توسعه دادند؛ مدلی که این موضوع را در قالب یک مدل خروجی محور مورد توجه قرار می‌دهد. تفاوت این مدل با سایر مدل‌ها در آن است که مؤلفه‌های خروجی نامطلوب^۳ را نیز در مجموعه داده‌ها لحاظ می‌کند. در این پژوهش، از مدل DEA با خروجی نامطلوب که در ادامه ارائه شده است، استفاده می‌شود. ماتریس‌های ورودی و خروجی واحدهای تصمیم‌گیرنده را به صورت (x_0, y_0) در نظر می‌گیریم. پارامترهای خروجی ماتریس y_0 را می‌توان به دو دسته تجزیه کرد: خروجی‌های مطلوب (Y_g) و خروجی‌های نامطلوب (Y_b) . تجزیه‌ی مربوط به هر کشور به صورت واحد تصمیم‌گیرنده (x_0, y_0^g, y_0^b) در نظر گرفته می‌شود.

1. Cooper, W.W; Seiford, L.M., & Tone, K.
2. Slack-Based Model
3. Bad Output-C

مجموعه امکانات تولید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \{(x, y_g, y_b) \mid x \geq X\lambda, y_g \leq Y_g\lambda, y_b \geq Y_b\lambda, L \leq e\lambda \leq U, \lambda \geq 0\} \quad (3)$$

که در آن λ بردار شدت، L کران پایین و U کران بالای λ هستند.

در چارچوب خروجی نامطلوب، یک واحد تصمیم‌گیرنده (x_0, y_0^g, y_0^b) زمانی کارا است که هیچ برداری (x, y_g, y_b) وجود نداشته باشد که در آن:

$$x_0 \geq x, \quad y_0^g \leq y_g, \quad y_0^b \geq y_b$$

برقرار باشد و حداقل یکی از این نامساوی‌ها بهبودپذیری را نشان دهد.

این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه مدل SBM در DEA برای ایجاد یک مدل DEA با

خروجی نامطلوب، به شکل زیر اصلاح شده است:

$$p^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i0}^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (4)$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} x_0 &= X\lambda + s^-; & y_0^g &= Y\lambda - s^g; & y_0^b &= Y\lambda + s^b; \\ L &\leq e\lambda \leq U; & s^-, s^g, s^b, \lambda &\geq 0. \end{aligned}$$

در این جا، بردار (s^-, s^b, s^g) به ترتیب بیانگر مازاد ورودی‌ها، مازاد خروجی‌های

نامطلوب و کمبود در خروجی‌های مطلوب است. s_1 و s_2 به ترتیب تعداد مؤلفه‌ها در s^g و

s^b هستند و $s = s_1 + s_2$ می‌باشد.

طبق نظر کوپر و همکاران (۲۰۰۶)، واحد تصمیم‌گیرنده (x_0, y_0^g, y_0^b) در حالت

خروجی نامطلوب زمانی کارا است که:

$$p^* = 1.$$

در ادامه، با حذف مازادها در ورودی‌ها و خروجی‌های نامطلوب و تمرکز بر جبران

کمبودها در خروجی‌های مطلوب، پیش‌بینی زیر برای بهبود یک واحد تصمیم‌گیرنده‌ی

ناکارا که در آن $p^* < 1$ است، ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} x_0 &\Leftarrow x_0 - s^{-*} \\ y_0^g &\Leftarrow y_0^g - s^{g*} \\ y_0^b &\Leftarrow y_0^b - s^{b*} \end{aligned} \quad (5)$$

روش تبدیلی چارنز-کوپر^۱، همان گونه که توسط تون^۱ در سال ۲۰۰۱ بیان شده است، با

تعریف متغیرها برای فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس (CRS)^۲ اجازه می‌دهد که روابط

1. Charnes, A., & Cooper, W. W.

کسری به یک برنامه‌ریزی خطی تبدیل شوند؛ به عبارت دیگر با قرار دادن $L = 0$ و $U = \infty$ ، روابط (۶) تا (۱۰) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\max u_g y_0^g - v x_0 - u_b y_0^b \quad (۶)$$

به طوری که:

$$u_g Y_g - v X - u_b y_b \leq 0 \quad (۷)$$

$$v \geq \frac{1}{m} \left[\frac{1}{x_0} \right] \quad (۸)$$

$$u_g \geq \frac{1 + u_g y_0^g - u_b y_0^b}{s} \left[\frac{1}{y_0^g} \right] \quad (۹)$$

$$u_b \geq \frac{1 + u_g y_0^g - v x_0 - u_b y_0^b}{s} \left[\frac{1}{y_0^b} \right] \quad (۱۰)$$

در این مدل، متغیرهای v ، u_b و u_g به ترتیب به عنوان مقادیر وزنی ورودی‌ها، خروجی‌های نامطلوب و خروجی‌های مطلوب در نظر گرفته می‌شوند.

بر اساس کوپر و همکاران (۲۰۰۶)، وزن‌های مربوط به خروجی‌های مطلوب و نامطلوب باید پیش از اجرای مدل خروجی نامطلوب مشخص شوند. عوامل وزنی باید با معیار $w_1, w_2 \geq 0$ سازگار باشند تا اطمینان حاصل شود که وزن‌های نسبی برآورد شده برای هر دو نوع خروجی (مطلوب و نامطلوب)، مناسب هستند. در این صورت، وزن‌های تعدیل شده به صورت زیر خواهند بود:

$$W_1 = \frac{sw_1}{w_1 + w_2}, \quad W_2 = \frac{sw_2}{w_1 + w_2}$$

تابع هدف به رابطه‌ی (۱۱) تبدیل خواهد شد و فرم نهایی مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$p^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{i0}^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s} \left(W_1 \sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + W_2 \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (۱۱)$$

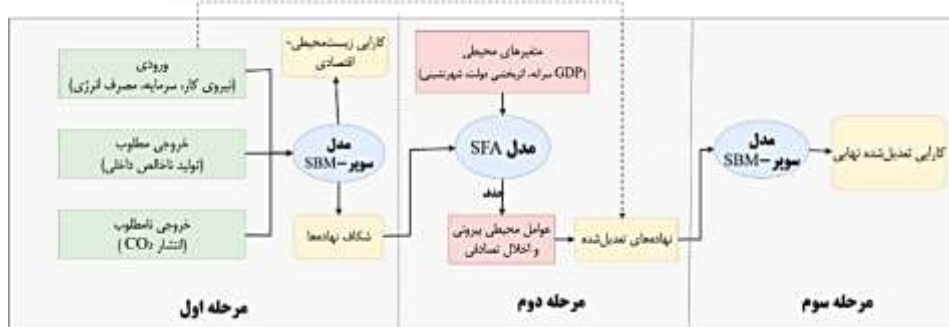
مقادیر پیش‌فرض برای w_1 و w_2 برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شوند. برای تأکید بر میزان توجهی که باید به ارزیابی خروجی‌های نامطلوب معطوف شود، می‌توان مقدار w_2 را

بزرگ‌تر از w_1 یا بالعکس در نظر گرفت. در نام‌گذاری این مدل، حرف (O) نشان‌دهنده‌ی خروجی‌های مثبت (مطلوب) و (OBAD) بیانگر خروجی‌های نامطلوب است.

۴. یافته‌های تحقیق

ارزیابی کارایی انرژی-اقتصادی در ۱۱ کشور نوظهور منتخب بر مبنای مدل SBM-DEA با خروجی نامطلوب انجام می‌شود و به‌عنوان محور اصلی تحلیل تجربی این پژوهش به کار می‌رود. روش‌شناسی تحقیق شامل سه مرحله‌ی اصلی است. در مرحله نخست، کارایی اولیه با استفاده از مدل SBM-DEA دارای خروجی نامطلوب برآورد می‌شود. در مرحله دوم، اثر متغیرهای محیطی و اختلالات تصادفی بر اسلک نهاده‌ها با استفاده از مدل مرز تصادفی بررسی می‌شود. در مرحله سوم، کارایی با استفاده از نهاده‌های تعدیل‌شده مجدداً محاسبه می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. فرایند سه‌مرحله‌ای SBM-DEA با خروجی نامطلوب برای برآورد کارایی تعدیل‌شده



منبع: یافته‌های تحقیق

۴-۱. گردآوری داده‌ها از واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs)

این مرحله شامل شناسایی مسئله و مرور جامع و گسترده‌ی ادبیات مرتبط با موضوع پژوهش است. هدف، ارزیابی کارایی استفاده از انرژی‌های در کشورهای در حال توسعه طی یک دوره‌ی ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳) است. در این مطالعه، سه متغیر شامل تشکیل سرمایه ناخالص، نرخ مشارکت نیروی کار و مصرف انرژی به‌عنوان نهاده‌های مدل در نظر گرفته شدند. همچنین تولید ناخالص داخلی به‌عنوان خروجی مطلوب و انتشار دی‌اکسید کربن بخش انرژی به‌عنوان خروجی نامطلوب وارد مدل شد. افزون بر این، برای کنترل

تفاوت‌های ساختاری و نهادی بین واحدهای مورد بررسی، متغیرهای محیطی شامل تولید ناخالص داخلی سرانه، شاخص اثربخشی دولت و شهرنشینی نیز لحاظ شده است.

جدول ۲. ورودی‌ها و خروجی‌های استفاده شده در محاسبه کارایی مصرف انرژی

نوع متغیر	نماد	نام متغیر	شرح
ورودی	Capital	Gross capital formation (constant 2015 US\$)	تشکیل سرمایه ناخالص ^۱
ورودی	Labor	Labor force participation rate, total (% of total population ages 15+)	نرخ مشارکت نیروی کار ^۲
ورودی	Energy	Energy use (kg of oil equivalent per capita)	مصرف انرژی
خروجی مطلوب	GDP	GDP (constant 2015 US\$)	تولید ناخالص داخلی
خروجی نامطلوب	CO ₂	Carbon dioxide (CO ₂) emissions from Power Industry (Energy) (Mt CO ₂ e)	انتشار دی‌اکسید کربن بخش نیرو/انرژی

منبع: یافته‌های تحقیق

لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به تمامی متغیرها از بانک جهانی (WDI) طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استخراج شده است.

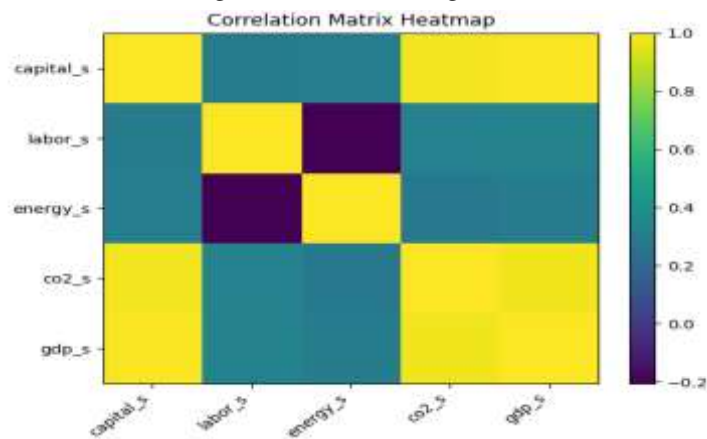
۴-۲. تحلیل همبستگی پیرسون و آمار توصیفی

در این مرحله، اجزای ورودی و خروجی منتخب به همراه مقادیر مورد انتظار آن‌ها، به منظور بررسی مناسب بودن برای پردازش DEA، از طریق محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون ارزیابی می‌شوند.

۱. برای نهاد سرمایه، این مطالعه بر پایه «تئوری سرمایه وینتیج» (Vintage Capital) از «تشکیل سرمایه ناخالص (GCF)» استفاده کرده است. در مباحث کارایی انرژی، تکنولوژی‌های بهینه‌سازی انرژی به صورت Embodied در تجهیزات و ماشین‌آلات جدید وارد اقتصاد می‌شوند. بنابراین، GCF جریان واقعی ورود این تکنولوژی‌های جدید را نمایندگی می‌کند. افزون بر این، محاسبه موجودی کل سرمایه در کشورهای نوظهور (با استفاده از روش موجودی دائمی) نیازمند فروض حسابداری متعددی در خصوص نرخ استهلاک و موجودی اولیه است که می‌تواند منجر به خطای اندازه‌گیری شدید (Measurement Error) شود. مدل‌های DEA نسبت به نویز داده‌ها حساس‌اند؛ لذا استفاده از متغیر مشاهده‌پذیر و استاندارد GCF، اعتبار محاسبات کارایی را تضمین می‌کند.

۲. در این پژوهش، نرخ مشارکت نیروی کار به عنوان شاخص ظرفیت عرضه فعال نیروی انسانی در اقتصاد استفاده شده است. این انتخاب به‌ویژه برای اقتصادهای نوظهور و درحال توسعه مناسب است، زیرا داده‌های تعداد شاغلان و ساعات کار در این کشورها تحت تأثیر تفاوت‌های آماری، اشتغال غیررسمی، خوداشتغالی و اشتغال ناقص قرار دارد. بنابراین، نرخ مشارکت نیروی کار به دلیل پوشش بین‌کشوری، قابلیت مقایسه و اتکا به برآوردهای استاندارد بین‌المللی، شاخص مناسبی برای وارد کردن بعد نیروی انسانی در مدل DEA محسوب می‌شود.

نمودار ۲. همبستگی میان ورودی‌ها و خروجی‌های تحقیق



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار (۲)، ضریب‌های همبستگی پیرسون را میان متغیرهای ورودی و خروجی مدل به صورت بصری نشان می‌دهد. در این نمودار، خانه‌های زرد نشان‌دهنده همبستگی‌های مثبت قوی‌تر هستند، در حالی که رنگ‌های تیره‌تر بیانگر روابط ضعیف‌تر یا نزدیک به صفر هستند. عنصرهای روی قطر اصلی مقدار ۱ دارند، بنابراین دقیقاً با خودشان همبسته هستند. به گونه‌ای که تمرکز بیشتر رنگ‌ها در سطوح بالاتر بیانگر وجود ارتباط نسبتاً قوی میان برخی متغیرها، به ویژه بین سرمایه، تولید ناخالص داخلی و انتشار CO₂ و نیز سطوح ملایم‌تر رنگ در سایر خانه‌ها نشان‌دهنده روابط ضعیف‌تر اما قابل تشخیص میان دیگر متغیرهاست.

جدول زیر، آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده در مدل را شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر مقادیر نشان می‌دهد.

جدول ۳. آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی

دسته‌بندی	شاخص	حداکثر	حداقل	میانگین
ورودی‌ها	تشکیل سرمایه ناخالص	۷۰۲۰	۱۳/۱۷	۵۱۶/۳۴
	نرخ مشارکت نیروی کار	۷۷/۵	۳۷/۴	۵۶/۲۸
	مصرف انرژی	۳۴۱۷/۵	۳۷۲/۵	۱۳۱۶
خروجی نامطلوب	انتشار دی‌اکسید کربن (CO ₂)	۶۴۸۶/۱	۱۰/۸۸	۵۰۸
خروجی مطلوب	تولید ناخالص داخلی (GDP)	۱۷۶۱۱/۵	۵۶/۱۶	۱۴۹۷/۲۶

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۴: آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی به تفکیک کشور

متغیر	آماره	برزیل	چین	مصر	هند	ایران	مکزیک	مراکش	فیلیپین	آفریقا	ترکیه	ویتنام
capital	میانگین	۳۰۷/۱	۳۸۷۹/۹	۴۳/۶	۵۹۴/۳	۱۸۸/۴	۲۵۵/۱	۲۹/۴	۵۵/۱	۵۳/۱	۲۰۴/۲	۶۹/۶
	حداقل	۲۲۱/۱	۷۰۲/۵	۲۴/۱	۱۷۲/۱	۱۰۶/۱	۱۹۱/۹	۱۳/۲	۲۲/۳	۲۹/۸	۷۲/۲	۲۰/۷
	حداکثر	۴۱۰/۴	۷۰۲۰/۱	۶۴/۸	۱۱۱۹/۲	۲۵۵	۳۱۲/۴	۳۹/۳	۱۰۰/۹	۶۴/۶	۳۲۷/۶	۱۲۷/۸
Labor	میانگین	۶۵/۲	۷۰/۱	۴۵/۸	۵۵/۲	۴۳	۶۰/۲	۴۸/۲	۶۰/۷	۵۴/۵	۴۰/۵	۷۵/۵
	حداقل	۶۰/۵	۶۵/۷	۴۱/۶	۵۱/۵	۴۰/۶	۵۶/۴	۴۴/۲	۵۴/۷	۵۰/۵	۳۷/۴	۷۳/۴
	حداکثر	۶۸/۱	۷۴/۲	۴۹/۴	۶۰/۱	۴۶/۱	۶۱/۷	۵۱/۳	۶۲/۲	۵۷/۳	۴۵/۵	۷۷/۵
Energy	میانگین	۱۳۳۷/۱	۱۹۲۳/۳	۸۱۳/۵	۵۵۶	۲۷۲۴	۱۵۷۷/۵	۵۲۹/۵	۴۷۶	۲۳۲۵/۲	۱۵۲۱/۹	۶۹۱/۸
	حداقل	۱۰۸۱/۴	۸۹۸/۱	۵۶۹/۹	۳۹۴/۹	۱۸۵۲/۲۲	۱۳۶۶/۴	۳۸۷/۷	۴۲۰/۷	۱۹۳۸/۳	۱۱۰۷/۳	۳۷۲/۵
	حداکثر	۱۵۲۲/۴	۲۸۵۰/۹	۹۲۸/۴	۷۵۴/۲	۳۴۱۷/۵	۱۷۲۳/۸	۶۱۶/۱	۵۵۴/۵	۲۷۳۸/۱	۱۸۹۴/۶	۱۰۲۳/۱
GDP	میانگین	۱۶۴۶/۸	۹۴۸۹/۱	۳۰۷/۳	۱۸۳۴	۳۹۷/۹	۱۱۳۰/۲	۹۷	۲۷۰/۸	۳۱۴/۷	۷۶۷/۱	۲۱۵/۱
	حداقل	۱۱۸۶/۴	۲۸۲۵/۱	۱۷۹/۷	۸۰۰/۵	۲۵۸/۱	۹۳۸/۵	۵۶/۲	۱۴۲/۸	۲۲۱/۷	۴۱۳/۹	۹۳/۵
	حداکثر	۱۹۶۱/۱	۱۷۶۱۱/۵	۴۷۰/۹	۳۲۶۵/۷	۵۱۵/۴	۱۳۳۱	۱۳۱	۴۳۰/۲	۳۶۳/۹	۱۲۷۴/۲	۳۷۸/۹
CO ₂	میانگین	۵۴/۱	۳۸۷۹/۳	۶۷/۲	۸۹۰/۲	۱۳۸/۸	۱۴۰	۲۰/۲	۴۴/۴	۲۲۶/۹	۵۸/۷	۶۸/۷
	حداقل	۲۹/۵	۱۴۲۶/۹	۲۷/۱	۴۵۹/۱	۷۰/۲	۱۲۱/۶	۱۰/۹	۲۲	۱۸۰/۴	۳۷/۵	۱۱/۵
	حداکثر	۱۰۰	۶۴۸۶/۱	۹۱/۱	۱۴۳۲/۹	۱۹۷/۶	۱۵۷/۶	۳۲	۸۵/۸	۲۵۳/۹	۸۱/۴	۱۷۰/۶

منبع: محاسبات محقق

نتایج به دست آمده از آمار توصیفی (جدول ۴) نشان می‌دهد که میان کشورهای مورد بررسی از منظر نهاده‌ها و ستاده‌ها تفاوت‌های معناداری وجود دارد. چین با ثبت بالاترین میانگین سرمایه، GDP و انتشار CO₂، در جایگاه بزرگ‌ترین اقتصاد نمونه مورد بررسی قرار دارد و دامنه تغییرات بالای این متغیرها در این کشور، پویایی شدیدتر ساختار اقتصادی آن را منعکس می‌کند. هند و برزیل نیز در سطوح نسبتاً بالای تولید قرار دارند، هرچند از منظر ترکیب نهاده‌ها و انتشار، الگوی متفاوتی را نشان می‌دهند. در مقابل، کشورهای مانند مراکش، مصر، فیلیپین و ویتنام از نظر سرمایه و تولید در مقیاس پایین‌تری قرار دارند. علاوه بر این، ایران و آفریقای جنوبی به‌رغم برخورداری از سطوح تولید متوسط، از مصرف انرژی نسبتاً بالایی برخوردارند که می‌تواند بیانگر شدت انرژی بیشتر در فعالیت‌های اقتصادی آن‌ها باشد. در مجموع، پراکندگی قابل توجه داده‌ها هم در سطح بین‌کشوری و هم در سطح درون‌کشوری، وجود ناهمگنی ساختاری در نمونه را تأیید می‌کند و این امر لزوم استفاده از رویکردی مانند DEA با خروجی نامطلوب را برای ارزیابی کارایی نسبی کشورها تقویت می‌کند.

جدول ۵: میانگین شاخص‌های کلیدی انرژی و کربن به تفکیک کشور

کشور	GDP سرانه	مصرف انرژی سرانه	CO ₂ بخش انرژی	سهم انرژی تجدیدپذیر	شدت انرژی	شدت کربن
------	-----------	------------------	---------------------------	---------------------	-----------	----------

۰/۳۴۳	۵۴۳/۵۷	۰/۹۳	۱۳۸/۷۸	۲۷۲۴/۰۲	۴۹۸۸/۸۴	ایران
۰/۵۰۱	۴۱۱/۹	۳۷/۳۶	۸۹۰/۲۱	۵۵۶/۰۴	۱۴۰۴/۸۸	هند
۰/۷۲۹	۴۰۵/۵۹	۹/۱۹	۲۲۶/۹۳	۲۳۲۵/۲۱	۵۷۵۸/۱۶	آفریقای جنوبی
۰/۴۳۹	۳۰۶/۶۱	۱۵/۰۲	۳۸۷۹/۲۸	۱۹۲۳/۳۱	۶۹۰۷/۷۹	چین
۰/۲۷۶	۲۹۸/۷۳	۳۴/۸	۶۸/۷۲	۶۹۱/۸۵	۲۳۴۸/۴	ویتنام
۰/۲۲	۲۵۵/۵۷	۵/۹۱	۶۷/۲۳	۸۱۳/۴۷	۳۲۱۰/۱۱	مصر
۰/۲۰۷	۱۸۷/۳۷	۱۳/۳۴	۲۰/۲	۵۲۹/۵۲	۲۸۴۰	مراکش
۰/۱۵۸	۱۸۵/۲	۳۱/۰۲	۴۴/۳۷	۴۷۶/۰۱	۲۶۶۲/۱۱	فیلیپین
۰/۱۲۵	۱۶۲/۳۳	۱۰/۰۷	۱۳۹/۹۶	۱۵۷۷/۵۳	۹۷۳۵	مکزیک
۰/۰۳۲	۱۵۹/۷۱	۴۵/۶۵	۵۴/۰۸	۱۳۳۷/۱۳	۸۳۶۹/۴۸	برزیل
۰/۰۸۳	۱۵۶/۷	۱۳/۷۱	۵۸/۶۳	۱۵۲۱/۹۴	۹۹۵۲/۲۴	ترکیه

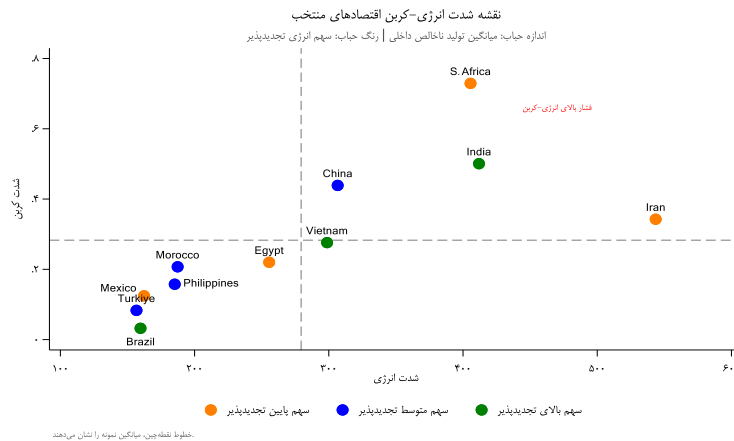
منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که کشورهای مورد مطالعه از نظر شدت انرژی و شدت کربن تفاوت‌های قابل توجهی دارند. ایران با شدت انرژی ۵۴۳/۵۷ بالاترین مقدار را در میان کشورهای نمونه دارد؛ به این معنا که اقتصاد ایران برای تولید هر واحد GDP سرانه، انرژی بیشتری نسبت به سایر کشورها مصرف می‌کند. پس از ایران، هند و آفریقای جنوبی بالاترین شدت انرژی را دارند. در مقابل، ترکیه، برزیل و مکزیک پایین‌ترین شدت انرژی را ثبت کرده‌اند و از نظر مصرف انرژی به ازای تولید، وضعیت مناسب‌تری دارند.

از نظر شدت کربن، آفریقای جنوبی، هند و چین در بالاترین جایگاه قرار دارند. این وضعیت نشان می‌دهد که تولید اقتصادی در این کشورها با بار کربنی بیشتری همراه است. در مقابل، برزیل و ترکیه کمترین شدت کربن را دارند. سهم بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در برزیل می‌تواند بخشی از شدت کربن پایین‌تر این کشور را توضیح دهد. با این حال، تفاوت میان شدت انرژی و شدت کربن کشورها نشان می‌دهد که هیچ شاخص منفردی به‌تنهایی قادر به ارزیابی کامل کارایی انرژی نیست.

بنابراین، شواهد آماری نشان می‌دهد که کشورهای منتخب هم از نظر مصرف انرژی نسبت به تولید و هم از نظر انتشار CO_2 نسبت به تولید ناهمگن هستند. این ناهمگنی، ضرورت استفاده از یک چارچوب چندنهادی و چندساده‌ای مانند DEA-SBM با خروجی نامطلوب را تقویت می‌کند. به بیان دیگر، شاخص‌های توصیفی نشان می‌دهند که تحلیل کارایی انرژی بدون لحاظ هم‌زمان نهاده‌های تولید، GDP و CO_2 می‌تواند تصویری ناقص از عملکرد کشورها ارائه دهد.

نمودار ۳. نقشه شدت انرژی-کربن اقتصادهای منتخب

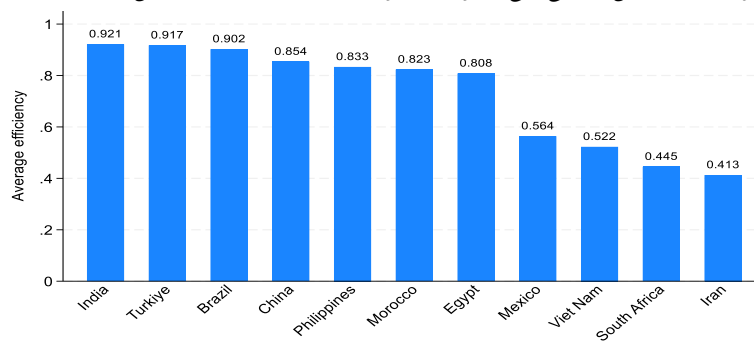


منبع: یافته‌های تحقیق

۳-۴. تحلیل داده‌ها با استفاده از روش DEA با خروجی نامطلوب (مرحله اول)

در این مرحله، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Stata 19.5 و بر اساس مدل تحلیل پوششی داده‌ها با خروجی نامطلوب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. این مدل به منظور سنجش کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده با لحاظ همزمان ستادهای مطلوب و نامطلوب به کار گرفته شد. امتیاز کارایی حاصل، مبنایی برای طبقه‌بندی و رتبه‌بندی واحدها بر اساس عملکرد نسبی آن‌ها فراهم می‌کند. بدین ترتیب، نتایج این مرحله زمینه لازم را برای شناسایی واحدهای کارا و ناکارا و نیز ارزیابی کلی عملکرد واحدهای مورد مطالعه فراهم می‌سازد.

نمودار ۴. میانگین کارایی فنی کشورهای مورد مطالعه با استفاده از روش SBM-DEA



منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول ۶ و نمودار ۴ نشان می‌دهد که کارایی فنی کشورها در چارچوب مدل SBM-VRS با خروجی نامطلوب از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند، بلکه با ناهمگنی قابل توجه بین کشوری و تغییرات زمانی متفاوت همراه است. در این چارچوب، امتیاز کارایی برابر با ۱ نشان‌دهنده قرار گرفتن کشور بر مرز کارا و امتیازهای کمتر از ۱ بیانگر فاصله از مرز کارایی و وجود ظرفیت بهبود در استفاده از نهاده‌ها، ارتقای خروجی مطلوب و کنترل خروجی نامطلوب است.

بررسی میانگین دوره‌ای نشان می‌دهد که هند (۰/۹۲۱)، ترکیه (۰/۹۱۷) و برزیل (۰/۹۰۲) بالاترین سطوح کارایی را در میان کشورهای مورد بررسی ثبت کرده‌اند. این کشورها نه تنها از نظر میانگین در جایگاه بالاتری قرار دارند، بلکه در چندین سال نیز به امتیاز کامل یا بسیار نزدیک به آن دست یافته‌اند؛ از این رو می‌توان آن‌ها را در زمره کشورهای دانست که در تبدیل نهاده‌های سرمایه، نیروی کار و انرژی به تولید ناخالص داخلی همراه با مهار خروجی نامطلوب، عملکرد نسبتاً مطلوب‌تری داشته‌اند. با این حال، این سه کشور از نظر ثبات عملکرد یکسان نیستند. هند الگوی باثبات‌تری را نشان می‌دهد و در بخش عمده دوره در سطوح بالای کارایی باقی مانده است، در حالی که برزیل و ترکیه با وجود دستیابی مکرر به مرز کارا، نوسان بیشتری را تجربه کرده‌اند.

در گروه بعدی، چین (۰/۸۵۴)، فیلیپین (۰/۸۳۳)، مراکش (۰/۸۲۳) و مصر (۰/۸۰۸) قرار می‌گیرند که از منظر میانگین دوره‌ای در سطح متوسط رو به بالا قرار دارند، اما روند زمانی آن‌ها مشابه نیست. چین مهم‌ترین نمونه بهبود تدریجی کارایی در بین کشورهای مورد بررسی است. این کشور از مقادیر پایین‌تر در سال‌های ابتدایی به تدریج به سطوح بالاتر نزدیک شده و در سال‌های پایانی به امتیازهای نزدیک به یک و حتی کارایی کامل رسیده است. چنین الگویی دلالت بر آن دارد که فاصله چین از مرز کارا در طول زمان کاهش یافته و این کشور توانسته است نسبت بین نهاده‌ها، خروجی مطلوب و خروجی نامطلوب را در جهت مطلوب‌تری تنظیم کند.

مصر نیز روندی قابل تأمل دارد. این کشور در ابتدای دوره چند بار به کارایی کامل رسیده، سپس وارد مرحله‌ای از افت کارایی شده و در سال‌های میانی در سطوح پایین‌تری تثبیت شده است؛ با این حال، در سال‌های پایانی دوباره مسیر بهبود را طی کرده و مجدداً به امتیازهای بالا و در برخی سال‌ها به کارایی کامل نزدیک یا برابر شده است. بنابراین،

الگوی مصر را می‌توان افت مقطعی و بازایی تدریجی توصیف کرد. در مقابل، مراکش و فیلیپین هرچند میانگین نسبتاً مطلوبی دارند، اما مهم‌ترین ویژگی آن‌ها نوسان‌پذیری است. وجود چند سال با کارایی کامل در کنار چند سال با افت محسوس نشان می‌دهد که این دو کشور هنوز از پایداری کافی در عملکرد کارایی برخوردار نیستند.

مکزیک (۰/۵۶۴) و ویتنام (۰/۵۲۲) در گروه کشورهای قرار می‌گیرند که کارایی آن‌ها در سطح متوسط رو به پایین ارزیابی می‌شود. با این حال، مکزیک و ویتنام نیز الگوهای زمانی متفاوتی دارند. مکزیک در کل دوره هیچگاه به مرز کارا نرسیده، اما در عین حال نوسانات بسیار شدید نیز نشان نداده است؛ بنابراین، می‌توان از نوعی کارایی متوسط پایین اما نسبتاً باثبات در مورد آن بحث کرد. ویتنام، از یک سطح نسبتاً بالا یا کامل در ابتدای دوره آغاز کرده، اما در ادامه با افت تدریجی و تداومی در کارایی روبه‌رو شده است. این الگو از منظر تحلیلی بسیار مهم است، زیرا نشان می‌دهد که این کشور به‌رغم برخورداری از وضعیت بهتر در آغاز دوره، در ادامه نتوانسته همان نسبت مطلوب بین نهاده‌ها، رشد اقتصادی و کنترل انتشار را حفظ کند و به تدریج از مرز کارایی فاصله گرفته است.

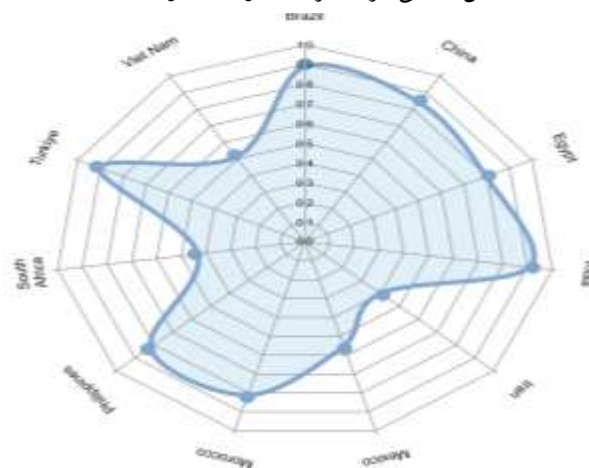
جدول ۶. امتیاز کارایی فنی حاصل از مدل SBM-VRS با خروجی نامطلوب به تفکیک کشور و سال

کشور	۲۰۰۰	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱	۲۰۲۲	۲۰۲۳	میانگین
برزیل	۰/۸۵۵	۰/۹۱۴	۱/۰۰	۰/۸۸۹	۰/۹۲۸	۰/۹۱۲	۰/۹۱۶	۰/۸۲۴	۱/۰۰	۰/۸۲۸	۱/۰۰	۰/۸۱۱	۰/۷۳۳	۰/۷۰۸	۰/۷۴۸	۱/۰۰	۰/۹۵۱	۰/۹۶۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۷۷۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۰۲
چین	۱/۰۰	۰/۹۲۳	۰/۷۷	۰/۷۰۹	۰/۷۳۷	۰/۷۳۵	۰/۷۴۳	۰/۷۶۴	۰/۷۵۱	۰/۷۴	۰/۷۳۸	۰/۷۶۴	۰/۷۷۷	۰/۸۱۳	۰/۸۸	۰/۹۲۱	۰/۹۳۹	۹۴۵/۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۸۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۵۴
مصر	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۵۳	۰/۷۷۹	۰/۷۳۶	۰/۶۸۷	۰/۶۶۵	۰/۶۹۲	۰/۶۹	۰/۶۹۵	۰/۶۷۹	۰/۷۲۹	۰/۷۳۱	۰/۷۲۵	۰/۷۰۲	۰/۷	۰/۷۹۳	۰/۸۶۹	۱/۰۰	۰/۹۵۸	۰/۹	۱/۰۰	۰/۸۰۸
هند	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۴۱	۰/۹۴۲	۰/۹۲۷	۰/۸۸۹	۰/۸۹	۰/۸۵۷	۰/۸۵۳	۰/۸۵۴	۰/۸۲۵	۰/۸۶۷	۰/۸۴۶	۰/۸۸۶	۰/۹۴۲	۰/۹۳۶	۰/۹۲۴	۰/۹۷۶	۱/۰۰	۰/۹۶۳	۰/۹۳۴	۰/۹۳۸	۰/۹۲۱
ایران	۰/۴۵۵	۰/۴۱۷	۰/۴۰۸	۰/۳۹۳	۰/۳۸۶	۰/۳۹۱	۰/۳۹۷	۰/۴	۰/۳۹	۰/۳۹۹	۰/۴۲۴	۰/۴۰۳	۰/۴۱۱	۰/۴۱۵	۰/۴۴۶	۰/۴۲۱	۰/۴۰۲	۰/۴۰۹	۰/۴۰۸	۰/۴۲۳	۰/۴۲۷	۰/۴۳۶	۰/۴۲۷	۰/۴۱۳
مکزیک	۰/۵۵۲	۰/۵۶۷	۰/۵۵۶	۰/۵۵	۰/۵۴۴	۰/۵۳۹	۰/۵۳۵	۰/۵۳۴	۰/۵۳۸	۰/۵۴۴	۰/۵۳۳	۰/۵۴۷	۰/۵۶	۰/۵۶۶	۰/۵۷	۰/۵۸۲	۰/۵۹	۰/۵۹۵	۰/۶۴۱	۰/۶۱۲	۰/۶۰۵	۰/۵۷۲	۰/۵۶۴	۰/۵۶۴
مراکش	۱/۰۰	۰/۹۲۴	۱/۰۰	۰/۷۵۴	۰/۷۴۹	۰/۷۴۶	۰/۷۱۴	۰/۶۵۶	۰/۷۸۲	۰/۷۷۸	۰/۷۱۴	۰/۷۶۹	۰/۸۶۱	۰/۷۸۶	۰/۷۹۴	۹۰۲/۰	۱/۰۰	۰/۹۰۶	۰/۶۶۲	۱/۰۰	۰/۶۸۳	۰/۷۴۷	۱/۰۰	۰/۸۲۳
فیلیپین	۰/۸۵۱	۰/۷۸۶	۰/۸۱	۰/۸۴۲	۰/۸۴۴	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۷	۱/۰۰	۰/۸۹۲	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۸۰۴	۰/۷۱۹	۰/۶۷۴	۰/۶۵۳	۰/۶۴۴	۸۷۹/۰	۸۷۹/۰	۰/۷۸۲	۰/۶۷۹	۰/۸۳	۰/۸۳۳
آفریقای جنوبی	۰/۴۷۱	۰/۴۷۷	۰/۴۵	۰/۴۲۶	۰/۴۳	۰/۴۲۱	۰/۴۱۳	۰/۳۹۸	۰/۴۱۷	۰/۴۳۲	۰/۴۲۴	۰/۴۳۱	۰/۴۲۸	۰/۴۳	۰/۴۳۲	۰/۴۴۳	۰/۴۴۲	۰/۴۵	۰/۴۴۵	۰/۵۱۱	۰/۵	۰/۴۸	۰/۴۸۲	۰/۴۴۵
ترکیه	۰/۷۸۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۳۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۷۳	۰/۸۵۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹	۰/۸۳۲	۰/۸۲۱	۰/۷۳۷	۰/۷۷۸	۱/۰۰	۰/۹۴۵	۰/۹۱۲	۰/۸۹۲	۰/۹۱۷
ویتنام	۱/۰۰	۰/۷۳۶	۰/۷۰۸	۰/۶۳۴	۰/۵۹۷	۰/۵۷۷	۰/۵۲۵	۰/۵۱۴	۰/۵۰۲	۰/۴۷	۰/۴۹۳	۰/۴۹۸	۰/۴۹۱	۰/۴۶۵	۰/۴۶۲	۰/۴۴۵	۰/۴۴۱	۰/۴۱۴	۰/۴	۰/۴۰۵	۰/۴۲۱	۰/۴۱	۰/۴۱۷	۰/۵۲۲

منبع: یافته‌های تحقیق

پایین‌ترین سطوح کارایی به آفریقای جنوبی (۰/۴۴۵) و ایران (۰/۴۱۳) تعلق دارد. هر دو کشور در کل دوره از مرز کارایی فاصله معناداری دارند و در هیچ‌یک از سال‌ها به امتیاز کامل دست نیافته‌اند. با این حال، نوع ناکارایی در این دو کشور دقیقاً یکسان نیست. آفریقای جنوبی در سطحی پایین اما نسبتاً با ثبات حرکت کرده و دامنه نوسان آن محدودتر است؛ این وضعیت می‌تواند بیانگر تداوم ناکارایی در یک سطح ثابت باشد. در مقابل، ایران نه تنها پایین‌ترین میانگین را ثبت کرده، بلکه در تمام دوره تقریباً در بازه‌ای فشرده و پایین باقی مانده است. چنین الگویی معمولاً به وجود ناکارایی مزمن و ساختاری دلالت دارد؛ یعنی فاصله این کشور از مرز کارایی نه ناشی از شوک‌های مقطعی، بلکه حاصل الگوی پایدار و کم‌اثر در تبدیل نهاده‌ها به GDP همراه با کنترل CO₂ است.

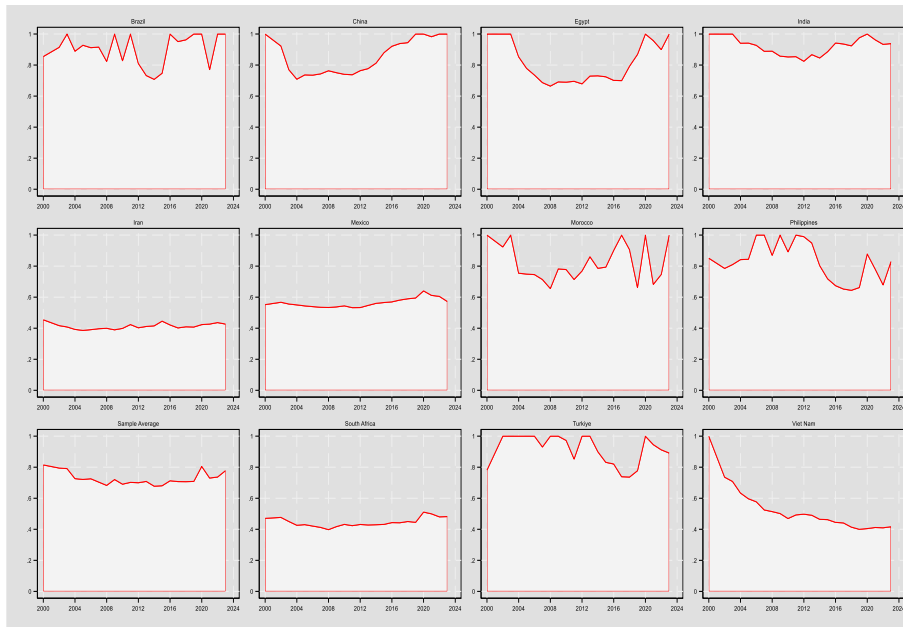
نمودار ۵. میانگین کارایی انرژی برای کشورهای مورد مطالعه



منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۵، توزیع مقایسه‌ای میانگین کارایی فنی کشورهای مورد بررسی را در قالب نمودار راداری نشان می‌دهد. بر این اساس، هند، ترکیه و برزیل در بخش بیرونی‌تر نمودار قرار گرفته‌اند که بیانگر نزدیکی بیشتر آن‌ها به مرز کارایی است، در حالی که ایران و آفریقای جنوبی در نواحی درونی‌تر قرار دارند و فاصله بیشتری از مرز کارا نشان می‌دهند. همچنین، جایگاه چین، مصر، مراکش و فیلیپین در بخش میانی نمودار بیانگر آن است که این کشورها از سطحی متوسط رو به بالا از کارایی برخوردارند، اما هنوز به سطح کشورهای پیشرو نرسیده‌اند.

نمودار ۶. روند زمانی کارایی فنی حاصل از مدل SBM-VRS با خروجی نامطلوب به تفکیک کشورها



نتایج نمودار ۶ مربوط به کارایی فنی نشان می‌دهد که عملکرد کشورهای مورد بررسی در چارچوب مدل SBM-VRS با خروجی نامطلوب از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند، بلکه با تفاوت‌های بین‌کشوری قابل توجه و روندهای زمانی ناهمسان همراه است. در این چارچوب، امتیاز کارایی برابر با ۱ بیانگر قرار گرفتن کشور بر مرز کارا و مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده فاصله از مرز کارایی است. بر این اساس، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که برخی کشورها در بخش عمده دوره در سطوح بالای کارایی قرار داشته‌اند، برخی مسیر بهبود تدریجی را تجربه کرده‌اند و برخی دیگر با کارایی پایین‌تر یا افت تدریجی روبه‌رو بوده‌اند. از این منظر، یافته‌ها مؤید آن است که تفاوت کشورها صرفاً به سطح کارایی محدود نمی‌شود، بلکه به ماهیت پویای تغییرات کارایی در طول زمان نیز وابسته است.

در میان کشورهای با عملکرد برتر، هند، ترکیه و برزیل بالاترین میانگین کارایی را نشان می‌دهند. هند از منظر ثبات عملکرد، الگوی منسجم‌تری دارد و در بیشتر سال‌های دوره در سطوح بالا و نزدیک به مرز کارا باقی مانده است. برزیل و ترکیه نیز اگرچه در سال‌های متعددی به کارایی کامل یا نزدیک به کامل رسیده‌اند، اما نسبت به هند نوسان بیشتری را تجربه کرده‌اند. این وضعیت نشان می‌دهد که این کشورها از ظرفیت بالایی برای

استفاده کاراتر از نهاده‌ها برخوردار بوده‌اند، هرچند تداوم این وضعیت در تمام سال‌ها یکسان نبوده است.

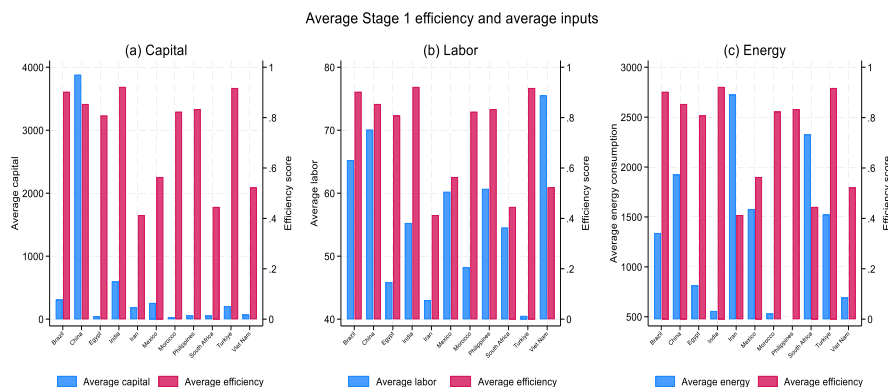
در سطح بعدی، چین، مصر، مراکش و فیلیپین در گروه کشورهایی قرار می‌گیرند که از کارایی متوسط رو به بالا برخوردارند، اما مسیر زمانی آن‌ها متفاوت است. چین مهم‌ترین نمونه بهبود تدریجی کارایی در میان کشورهای مورد بررسی است؛ به گونه‌ای که از سطوح پایین‌تر در ابتدای دوره به تدریج به سطوح بالاتر و در سال‌های پایانی به مرز کارا نزدیک شده است. مصر نیز پس از یک دوره افت در میانه دوره، در سال‌های پایانی روند بهبود را نشان می‌دهد. در مقابل، مراکش و فیلیپین با وجود ثبت سطوح نسبتاً مطلوب کارایی در برخی سال‌ها، نوسان‌پذیری بیشتری دارند؛ امری که نشان می‌دهد مسئله اصلی در این کشورها نه فقدان کامل کارایی، بلکه نبود ثبات کافی در حفظ عملکرد کارا است. در گروه کشورهای با کارایی متوسط رو به پایین، مکزیک و ویتنام دو الگوی متفاوت را نشان می‌دهند. مکزیک در کل دوره در سطحی نسبتاً ثابت و متوسط پایین حرکت می‌کند و نوسانات آن محدودتر است؛ بنابراین، می‌توان از نوعی ناکارایی ملایم اما نسبتاً پایدار سخن گفت. در مقابل، ویتنام از وضعیت نسبتاً مطلوب‌تر در ابتدای دوره به سمت افت تدریجی کارایی حرکت کرده و در سال‌های بعد در سطوح پایین‌تری تثبیت شده است. این وضعیت نشان می‌دهد که حفظ تعادل میان استفاده از نهاده‌ها، رشد اقتصادی و کنترل خروجی نامطلوب در این کشور در طول زمان با دشواری بیشتری همراه بوده است. در این میان، ایران نیز یکی از الگوهای مهم و قابل توجه را در نتایج نشان می‌دهد. اگرچه ایران از نظر میانگین کارایی در زمره کشورهای با عملکرد پایین‌تر قرار می‌گیرد، اما اهمیت تحلیلی آن بیش از صرفاً «پایین بودن میانگین» است. مسیر زمانی ایران در بخش عمده دوره در بازه‌ای نسبتاً فشرده و پایین نوسان می‌کند و برخلاف کشورهایی مانند چین یا مصر، نشانه‌ای از جهش یا بهبود معنادار و پایدار در آن مشاهده نمی‌شود. این ویژگی از منظر تحلیلی حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که فاصله ایران از مرز کارایی بیشتر ماهیتی پایدار و ساختاری دارد تا مقطعی و کوتاه‌مدت. به بیان دیگر، مسئله اصلی در مورد ایران صرفاً کمبود منابع یا نوسان‌های گذرا نیست، بلکه به نظر می‌رسد چالش اصلی در کیفیت استفاده از نهاده‌ها، شدت مصرف انرژی و توانایی تبدیل آن‌ها به تولید اقتصادی همراه با کنترل انتشار CO₂ نهفته باشد. با این حال، دامنه نوسان محدود کارایی در ایران

نشان می‌دهد که این کشور بیش از آنکه با بی‌ثباتی شدید مواجه باشد، با نوعی کارایی پایین اما نسبتاً تثبیت‌شده روبرو است؛ موضوعی که از منظر سیاست‌گذاری، لزوم اصلاحات تدریجی اما ساختاری را برجسته می‌سازد.

آفریقای جنوبی نیز در کنار ایران در زمره کشورهای کم‌کارتر قرار می‌گیرد، هرچند الگوی آن اندکی متفاوت است. این کشور نیز در سطحی پایین‌تر از میانگین نمونه قرار دارد، اما در سال‌های پایانی نشانه‌هایی از بهبود جزئی در آن دیده می‌شود. بنابراین، اگرچه هر دو کشور از مرز کارایی فاصله دارند، در مورد ایران الگوی پایداری ناکارایی برجسته‌تر است، در حالی که آفریقای جنوبی نوعی بهبود محدود در انتهای دوره را تجربه کرده است.

نمودار ۷. مقایسه توصیفی میانگین کارایی فنی با میانگین نهاده‌های اصلی (سرمایه، نیروی کار و

انرژی) در کشورهای مورد بررسی



نمودار ۷ مقایسه‌ای توصیفی میان میانگین کارایی فنی کشورها و سطح میانگین نهاده‌های اصلی شامل سرمایه، نیروی کار و انرژی ارائه می‌کند. هدف این نمودار، شناسایی عوامل مؤثر بر کارایی نیست، بلکه نشان دادن این نکته است که تفاوت در سطح نهاده‌ها لزوماً به تفاوت مشابه در کارایی منجر نمی‌شود. از آنجا که این متغیرها خود در محاسبه شاخص کارایی وارد شده‌اند، تفسیر نمودار باید صرفاً در سطح توصیفی و مقایسه‌ای انجام شود، نه به صورت علی. یافته‌ها نشان می‌دهد که کشورهایی با سطوح بالاتر نهاده، الزاماً کاراتر نیستند؛ به بیان دیگر، کارایی بیش از آنکه به حجم مطلق نهاده‌ها وابسته باشد، به نحوه ترکیب، تخصیص و بهره‌برداری از آن‌ها در تولید ستاده مطلوب همراه با کنترل ستاده نامطلوب بستگی دارد. در این میان، الگوی مربوط به انرژی برجسته‌تر است؛

به گونه‌ای که در برخی کشورها، مصرف بالاتر انرژی با سطوح پایین‌تر کارایی همراه شده است. این وضعیت نشان می‌دهد که شدت مصرف انرژی، در صورت همراه نبودن با تولید متناسب و مهار انتشار، می‌تواند با فاصله بیشتر از مرز کارایی همراه باشد.

در مجموع، سه بخش نمودار ۷، به روشنی بیانگر آن هستند که تفاوت کشورها در کارایی مرحله اول، بیش از آنکه ناشی از سطح مطلق سرمایه، نیروی کار و انرژی باشد، به کیفیت تخصیص، بهره‌برداری و هماهنگی این نهاده‌ها در تولید GDP همراه با کنترل CO₂ مربوط می‌شود. این نتیجه از منظر نظری و روشی اهمیت زیادی دارد، زیرا یکی از مزیت‌های اصلی مدل SBM با خروجی نامطلوب آن است که کشورها را نه بر اساس اندازه منابع، بلکه بر اساس توان واقعی آن‌ها در استفاده بهینه از منابع و مهار پیامدهای زیست‌محیطی ارزیابی می‌کند. در نتیجه، نمودار فوق، یافته‌های جدول کارایی را تأیید کرده و نشان می‌دهد که کشورهای با کارایی بالاتر الزاماً بیشترین نهاده‌ها را در اختیار ندارند، بلکه کشورهایی هستند که توانسته‌اند توازن کاراتری میان نهاده‌های اقتصادی، مصرف انرژی، رشد اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی برقرار سازند.

۴-۴. تحلیل اثر متغیرهای محیطی بر مازاد نهاده‌ها با استفاده از مدل مرز

تصادفی (مرحله دوم)

پس از برآورد کارایی و استخراج اسلک‌های نهاده‌ای در مرحله اول تخمین (SBM-DEA)، مرحله دوم (SFA) با هدف تبیین ریشه‌های محیطی و ساختاری این مازادها انجام شد. منطق این مرحله آن است که اسلک‌های مشاهده‌شده را نمی‌توان صرفاً به ناکارایی مدیریتی یا فنی نسبت داد، زیرا بخشی از آن‌ها ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی خارج از کنترل مستقیم واحدها، از جمله کیفیت حکمرانی، سطح توسعه اقتصادی، شهرنشینی و ساختار سبد انرژی باشد. از این‌رو، مرحله دوم از «اندازه‌گیری ناکارایی» فراتر رفته و به «تبیین ناکارایی» می‌پردازد. در این مرحله، برای هر یک از معادلات اسلک سرمایه، نیروی کار و انرژی، مدل مرز تصادفی پانلی برآورد شد. متغیرهای محیطی مشترک شامل اثربخشی دولت، لگاریتم GDP سرانه و شهرنشینی بودند و علاوه بر آن، در معادله مازاد انرژی، متغیر سهم انرژی‌های تجدیدپذیر نیز به صورت اختصاصی وارد شد، زیرا این متغیر از نظر مفهومی ارتباط مستقیم‌تری با ساختار مصرف و کارایی انرژی دارد.

جدول ۷. برآورد اثر متغیرهای محیطی بر مازاد نهاده‌های سرمایه، نیروی کار و انرژی با مدل SFA

نتایج برآورد مدل مز تصادفی برای مازاد انرژی			نتایج برآورد مدل مز تصادفی برای مازاد نیروی کار			نتایج برآورد مدل مز تصادفی برای مازاد سرمایه			
متغیر	ضریب	آماره z	prob	ضریب	آماره z	prob	ضریب	آماره z	prob
اثر بخشی دولت	-۳۰/۲۱۳	-۱/۳۹	۰/۱۶۴	-۱/۴۱۷	-۱/۵۸	۰/۱۱۴	۰/۱۵۲	۰/۲۳	۰/۸۲
لگاریتم GDP سرانه	۸۸/۹۲۵	۲/۸۷	۰/۰۰۴	۰/۶۷۸	۰/۴۹	۰/۶۲۴	-۳/۰۱	-۱/۹۲	۰/۰۵۵
شهرنشینی	-۱/۶۷۴	-۱/۶۷	۰/۰۹۶	-۰/۱۳۳	-۱/۷۶	۰/۰۷۹	۰/۱۲۸	۲/۴۵	۰/۰۱۴
انرژی تجدیدپذیر	-	-	-	-	-	-	-	-۲/۷۰	۰/۰۰۷
عرض از مبدا	-۶۴/۶۲۵	-۲/۹۹	۰/۰۰۳	-۰/۳۵۸	-۰/۰۴	۰/۹۶۷	۱۸/۱۸	۱/۷۶	۰/۰۷۹
والد (χ^2)	۲۸/۱۱	۰/۰۱	۱۰/۳۷	۰/۰۱۶	۱۵/۸۲	۰/۰۰۳			
گاما	۰/۶۹				۰/۹۷۴				۰/۹۵۸

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول ۷ حاکی از آن است که در معادله مازاد سرمایه، مدل از نظر آماری معنادار است و GDP سرانه با اثری مثبت و معنادار، مازاد سرمایه‌ای را افزایش می‌دهد؛ به این معنا که سطح بالاتر توسعه اقتصادی لزوماً با استفاده کارا تر از سرمایه همراه نبوده است. در مقابل، شهرنشینی با اثری منفی و معنادار در سطح ۱۰ درصد، مازاد سرمایه را کاهش می‌دهد و بیانگر آن است که تمرکز شهری می‌تواند از طریق بهبود زیرساخت، هم‌افزایی فضایی و کاهش هزینه‌های مبادله، کارایی استفاده از سرمایه را ارتقا دهد. در معادله مازاد نیروی کار نیز مدل معنادار بود و شهرنشینی تنها متغیر معنادار به شمار آمد. علامت منفی این متغیر نشان می‌دهد که توسعه شهرنشینی با کاهش مازاد نیروی کار و بهبود نسبی کارایی در استفاده از این نهاد همراه است؛ نتیجه‌ای که می‌توان آن را ناشی از کارکرد بهتر بازار کار شهری، انطباق بیشتر مهارت‌ها با نیازهای تولید و دسترسی بهتر به خدمات آموزشی و اقتصادی دانست.

در معادله مازاد انرژی، نتایج نشان می‌دهد که کل مدل از نظر آماری معنادار است و مقدار بالای گاما نشان داد که بخش عمده واریانس خطا ناشی از ناکارایی است. در این معادله، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر با اثری منفی و معنادار، مازاد انرژی را کاهش داده و

بنابراین نقش کاهنده‌ای بر ناکارایی انرژی ایفا می‌کند. این یافته بیانگر آن است که حرکت به سمت سبد انرژی پاک‌تر و مدرن‌تر می‌تواند بهره‌وری استفاده از انرژی را بهبود دهد. در مقابل، شهرنشینی با اثری مثبت و معنادار، مازاد انرژی را افزایش می‌دهد که نشان می‌دهد گسترش شهرنشینی، در صورت همراه نبودن با زیرساخت و مدیریت مناسب، می‌تواند فشار بیشتری بر مصرف انرژی وارد کند. همچنین GDP سرانه با علامتی منفی و در سطح مرزی معناداری، حاکی از آن است که کشورهای برخوردارتر در بعد انرژی، به‌طور نسبی مازاد کمتری دارند. به‌طور کلی، نتایج مرحله دوم نشان می‌دهد که متغیرهای محیطی بر همه نهاده‌ها یکسان اثر نمی‌گذارند و ساختار ناکارایی در این پژوهش ماهیتی نهاده‌ویژه دارد. از این رو، سیاست‌های ارتقای کارایی نیز باید متناسب با نوع نهاده و سازوکار اثرگذاری متغیرهای محیطی طراحی شوند.

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که در هر سه معادله مرحله دوم، مقدار گاما بزرگ‌تر از سهم نوین تصادفی است. از آنجا که گاما سهم واریانس جزء ناکارایی از واریانس کل خطای ترکیبی را نشان می‌دهد، مقادیر گزارش‌شده بیانگر آن است که پس از لحاظ کردن متغیرهای محیطی در مدل مرز تصادفی، بخش مهمی از تغییرات باقیمانده در اسلک‌های نهاده‌ای بیشتر با جزء ناکارایی توضیح داده می‌شود تا صرفاً با اختلالات تصادفی.

جدول ۸. اجزای واریانس خطای مدل مرز تصادفی در مرحله دوم رویکرد سه مرحله‌ای DEA

متغیر وابسته در مرحله دوم	تعداد مشاهدات	لگاریتم درست‌نمایی	آماره والد	احتمال آماره والد	واریانس کل خطا	واریانس ناکارایی	واریانس نويز تصادفی	گاما	سهم نويز تصادفی	نسبت واریانس نويز به ناکارایی
اسلک سرمایه	۲۵۳	-۱۴۲۱/۴۷۷۱	۱۴/۷۹	۰/۰۰۵۲	۱۲۵۱۶/۲۷	۸۵۴۸/۸۲۸	۳۹۶۷/۴۴۲	۰/۶۸۳۰	۰/۳۱۷۰	۰/۴۶۴۱
اسلک نیروی کار	۲۵۳	-۶۰۵/۵۳۵۷	۹۱/۳۲	۰/۰۰۰۰	۱۹۹/۹۵۱۴	۱۹۴/۴۸۴۷	۵/۴۶۶۷	۰/۹۷۲۷	۰/۰۲۷۳	۰/۰۲۸۱
اسلک انرژی	۲۵۳	-۱۷۰۳/۷۸۰۹	۱۵/۶۷	۰/۰۰۳۵	۷۹۹۹۴۵/۳	۷۶۶۴۳۲/۵	۳۳۵۱۲/۷۶	۰/۹۵۸۱	۰/۰۴۱۹	۰/۰۴۳۷

منبع: یافته‌های تحقیق (نکته: واریانس کل خطا (σ^2) برابر مجموع واریانس ناکارایی (σ_u^2) و واریانس نويز تصادفی (σ_v^2) است. گاما (γ) سهم واریانس ناکارایی از واریانس کل خطای ترکیبی را نشان می‌دهد. سهم نويز تصادفی برابر با یک منهای گاما است. نسبت واریانس نويز به ناکارایی از تقسیم واریانس نويز تصادفی بر واریانس ناکارایی محاسبه شده است $(\gamma = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_v^2})$).

در معادله اسلک سرمایه، مقدار گاما برابر با ۰/۶۸۳۰ است؛ بنابراین حدود ۶۸/۳ درصد از واریانس خطای ترکیبی به جزء ناکارایی و حدود ۳۱/۷ درصد به نويز تصادفی مربوط می‌شود. نسبت واریانس نويز تصادفی به ناکارایی نیز در این معادله برابر با ۰/۴۶۴۱ است. این مقدار نشان می‌دهد که اگرچه جزء ناکارایی در توضیح اسلک سرمایه سهم بیشتری دارد، اما سهم نويز تصادفی نیز در این معادله قابل چشم‌پوشی نیست. بنابراین، تفسیر نتایج مربوط به اسلک سرمایه باید محتاطانه‌تر از دو اسلک دیگر انجام شود.

در معادله اسلک نیروی کار، مقدار گاما برابر با ۰/۹۷۲۷ است؛ یعنی حدود ۹۷/۳ درصد از واریانس خطای ترکیبی به جزء ناکارایی نسبت داده می‌شود و تنها حدود ۲/۷ درصد آن به نويز تصادفی مربوط است. نسبت واریانس نويز به ناکارایی نیز برابر با ۰/۰۲۸۱ است که نشان می‌دهد نقش نويز تصادفی در مقایسه با جزء ناکارایی بسیار محدود است. بنابراین، اسلک نیروی کار عمدتاً بازتاب ناکارایی در استفاده از نهاده نیروی کار است، نه صرفاً نوسانات تصادفی.

در معادله اسلک انرژي نیز مقدار گاما برابر با ۰/۹۵۸۱ است. این مقدار نشان می‌دهد حدود ۹۵/۸ درصد از واریانس خطای ترکیبی به جزء ناکارایی و حدود ۴/۲ درصد به نویز تصادفی مربوط می‌شود. همچنین نسبت واریانس نویز به ناکارایی برای اسلک انرژي برابر با ۰/۴۳۷ است. این نتیجه نشان می‌دهد که مازاد مصرف انرژي در کشورهای مورد مطالعه، پس از کنترل متغیرهای محیطی، عمدتاً با ناکارایی در استفاده از انرژي مرتبط است و سهم اختلالات تصادفی در توضیح آن محدود است.

۵-۴. برآورد کارایی تعدیل‌شده در چارچوب مدل SBM-VRS با خروجی نامطلوب (مرحله سوم)

پس از آنکه در مرحله دوم اثر متغیرهای محیطی بر مازاد نهاده‌ها برآورد شد، ورود به مرحله سوم به‌عنوان یک گام ضروری در چارچوب روش‌شناسی پژوهش مطرح گردید. امتیازهای کارایی مرحله اول، اگرچه برآوردی اولیه از موقعیت نسبی کشورها ارائه می‌کردند، اما همچنان می‌توانستند تحت تأثیر عواملی قرار گیرند که الزاماً بیانگر عملکرد واقعی و درون‌زای واحدها نبودند. یافته‌های مرحله دوم نشان داد که بخشی از مازادهای نهاده‌ای با متغیرهای محیطی نظیر سطح توسعه اقتصادی، شهرنشینی و در مورد انرژي، سهم انرژي‌های تجدیدپذیر، مرتبط است. بنابراین، اتکا به کارایی اولیه مرحله اول می‌توانست به این منجر شود که بخشی از تفاوت‌های بین‌کشوری به اشتباه به تفاوت در کارایی مدیریتی نسبت داده شود، در حالی که این تفاوت‌ها تا حدی ناشی از شرایط محیطی و ساختاری بودند.

بر این مبنای، در مرحله سوم، امتیازهای کارایی با اتکا بر نهاده‌های تعدیل‌شده مجدداً برآورد شد تا ارزیابی نهایی کشورها بر پایه کارایی خالص‌تری صورت گیرد. جدول ۹ نتایج نهایی کارایی تعدیل‌شده را به تفکیک کشور ارائه می‌کند. در این جدول، کشورها بر اساس میانگین امتیاز کارایی پس از حذف اثر شرایط محیطی و اختلالات تصادفی رتبه‌بندی شده‌اند.

جدول ۹. رتبه‌بندی کشورها بر اساس امتیاز کارایی تعدیل‌شده در مرحله سوم

رتبه	کشور	میانگین امتیاز کارایی	حداقل	حداکثر
۱	ترکیه	۰/۹۶۱	۰/۸۰۴	۱/۰۰
۲	مصر	۰/۹۵۵	۰/۸۱۴	۱/۰۰
۳	برزیل	۰/۹۲۸	۰/۷۸۲	۱/۰۰

۴	مراکش	۰/۹۱۰	۰/۷۶۴	۱/۰۰
۵	چین	۰/۸۸۱	۰/۷۶۱	۱/۰۰
۶	هند	۰/۸۴۰	۰/۶۹۸	۱/۰۰
۷	مکزیک	۰/۶۷۲	۰/۶۶۱	۰/۶۸۹
۸	فیلیپین	۰/۶۵۳	۰/۶۳۱	۰/۷۰۱
۹	آفریقای جنوبی	۰/۵۳۹	۰/۵۱۲	۰/۵۶۰
۱۰	ویتنام	۰/۴۸۸	۰/۳۷۸	۰/۷۳۰
۱۱	ایران	۰/۴۸۷	۰/۳۶۸	۰/۵۵۳

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که پس از تعدیل نهاده‌ها و حذف اثر شرایط محیطی و اختلالات تصادفی، تفاوت‌های معناداری در سطح کارایی کشورها همچنان باقی مانده است. این یافته بیانگر آن است که بخشی از شکاف کارایی مشاهده‌شده در مرحله اول، اگرچه با عوامل محیطی توضیح داده می‌شود، اما بخش مهمی از آن ماهیتی درون‌زا داشته و به کیفیت تخصیص نهاده‌ها، شدت مصرف انرژی، سطح فناوری و توانایی کشورها در مدیریت همزمان رشد اقتصادی و کنترل انتشار CO₂ مربوط می‌شود. در نتیجه، مرحله سوم تصویری خالص‌تر و معتبرتر از عملکرد واقعی کشورها ارائه می‌کند و مبنای مناسب‌تری برای کارایی نسبی آن‌ها به شمار می‌رود.

بر اساس نتایج این مرحله، ترکیه، مصر و برزیل به ترتیب با میانگین امتیازهای ۰/۹۶۱، ۰/۹۵۵ و ۰/۹۲۸ در صدر رتبه‌بندی قرار گرفته‌اند. قرار گرفتن این کشورها در بالاترین سطوح کارایی تعدیل‌شده نشان می‌دهد که مزیت آن‌ها صرفاً حاصل شرایط محیطی مساعد نبوده، بلکه پس از کنترل این شرایط نیز توانسته‌اند ترکیب مناسب‌تری از سرمایه، نیروی کار و انرژی را در کنار تولید اقتصادی و کنترل نسبی خروجی نامطلوب حفظ کنند. در این میان، ترکیه و مصر با حداقل‌های نسبتاً بالا و حداکثر ۱/۰۰، الگوی پایداری از کارایی را نشان می‌دهند، در حالی که برزیل نیز با وجود تعداد مشاهدات کمتر، همچنان در زمره کشورهای بسیار کارا باقی مانده است.

در سطح بعدی، مراکش، چین و هند قرار دارند که به ترتیب میانگین‌های ۰/۹۱۰، ۰/۸۸۱ و ۰/۸۴۰ را ثبت کرده‌اند. این گروه را می‌توان در زمره کشورهای با کارایی بالا اما نه در سطح گروه پیشرو طبقه‌بندی کرد. مراکش با وجود مقیاس اقتصادی کوچک‌تر نسبت به برخی کشورها، پس از تعدیل محیطی همچنان عملکرد بسیار مطلوبی را نشان

می‌دهد که می‌تواند بیانگر تخصیص نسبتاً مناسب نهاده‌ها باشد. چین نیز با وجود ساختار اقتصادی و انرژی‌بر بزرگ، توانسته است سطح نسبتاً بالایی از کارایی تعدیل‌شده را حفظ کند؛ موضوعی که نشان می‌دهد بخشی از توانایی این کشور در نزدیک شدن به مرز کارا، به عوامل مدیریتی و ساختاری درون‌زا بازمی‌گردد. هند نیز اگرچه در گروه نسبتاً کارا قرار دارد، اما فاصله آن با کشورهای صدر جدول نشان می‌دهد که بخشی از مزیت آن در مرحله اول، پس از حذف اثر محیطی، تعدیل شده و تصویر متوازن‌تری از کارایی آن به دست آمده است.

در گروه میانی، مکزیک و فیلیپین با میانگین‌های ۰/۶۷۲ و ۰/۶۵۳ قرار دارند. این ارقام نشان می‌دهد که این دو کشور نه در زمره کشورهای کم‌کارتر قرار می‌گیرند و نه به مرز کارایی تعدیل‌شده نزدیک شده‌اند. به بیان دیگر، عملکرد آن‌ها حاکی از کارایی متوسط اما ناکامل است. حداقل و حداکثر نسبتاً محدود این کشورها نیز نشان می‌دهد که سطح کارایی آن‌ها در طول دوره با نوسانات شدید همراه نبوده و بیشتر در یک محدوده میانی تثبیت شده است. از منظر سیاستی، این گروه از کشورها ظرفیت قابل توجهی برای ارتقای کارایی از طریق بهبود بهره‌وری نهاده‌ها و اصلاحات تدریجی در ساختار تولید دارند.

در پایین جدول، آفریقای جنوبی، ویتنام و ایران قرار دارند که به ترتیب میانگین امتیازهای ۰/۵۳۹، ۰/۴۸۸ و ۰/۴۸۷ را ثبت کرده‌اند. پایین بودن کارایی این کشورها پس از تعدیل محیطی نشان می‌دهد که فاصله آن‌ها از مرز کارا را دیگر نمی‌توان صرفاً به شرایط بیرونی نسبت داد، بلکه بخش مهمی از آن به عوامل درون‌زا و ساختاری بازمی‌گردد. آفریقای جنوبی با وجود قرار گرفتن در رتبه نهم، دامنه تغییرات نسبتاً محدودی دارد و این امر می‌تواند نشان‌دهنده نوعی ناکارایی پایدار و مزمن باشد. ویتنام با میانگین نزدیک به ایران، اما حداکثر بالاتر، نشان می‌دهد که در برخی دوره‌ها توان نزدیک‌تر شدن به مرز کارا را داشته، اما نتوانسته این وضعیت را به صورت پایدار حفظ کند. ایران نیز با پایین‌ترین میانگین کارایی و حداقل ۰/۳۶۸ در انتهای جدول قرار گرفته است؛ نتیجه‌ای که بیانگر آن است که حتی پس از کنترل اثر تفاوت‌های محیطی، همچنان شکاف معناداری میان وضعیت واقعی ایران و مرز کارایی تعدیل‌شده وجود دارد. با این حال، ایران باید در همین چارچوب مقایسه‌ای تفسیر شود؛ یعنی نه به عنوان موردی منفرد، بلکه به عنوان کشوری که همراه با ویتنام و آفریقای جنوبی در گروه کم‌کارتر قرار می‌گیرد و برای بهبود عملکرد

خود نیازمند اصلاحات ساختاری، ارتقای بهره‌وری انرژی و بهبود کیفیت مدیریت نهاده‌هاست.

به‌طور کلی، نتایج مرحله سوم نشان می‌دهد که کشورها را می‌توان در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی کرد:

- نخست، کشورهای بسیار کارا شامل ترکیه، مصر و برزیل؛
 - دوم، کشورهای نسبتاً کارا شامل مراکش، چین و هند؛
 - سوم، کشورهای با کارایی متوسط شامل مکزیک و فیلیپین؛
 - و چهارم، کشورهای با کارایی پایین‌تر شامل آفریقای جنوبی، ویتنام و ایران.
- این طبقه‌بندی نشان می‌دهد که پس از حذف اثر محیط بیرونی، شکاف کارایی همچنان پابرجاست و بنابراین بخش مهمی از تفاوت عملکرد کشورها به ساختار درونی اقتصاد، نحوه استفاده از نهاده‌ها، کیفیت فناوری و توان مدیریت همزمان رشد اقتصادی و کنترل انتشار مربوط می‌شود. از این رو، مرحله سوم مبنای قابل اتکاتری برای تحلیل سیاستی و ارائه توصیه‌های اصلاحی در مقایسه با کارایی اولیه مرحله اول فراهم می‌آورد.

- بررسی پایداری رتبه‌بندی کارایی مرحله اول و مرحله سوم

آزمون استحکام نتایج^۱، برای اطمینان از پایداری ارزیابی‌ها، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (rho) میان رتبه‌بندی کشورها در مرحله نخست (مدل SBM اولیه) و مرحله سوم (پس از کنترل شرایط محیطی و نویز) محاسبه شد.

جدول ۱۰. آزمون استحکام رتبه‌بندی کارایی مرحله اول و مرحله سوم

نوع آزمون	سطح محاسبه	تعداد مشاهدات	ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن	مقدار احتمال
همبستگی رتبه‌ای کارایی مرحله اول و سوم	کل داده‌های کشور-سال	۲۵۲	۰/۷۹۸۳	۰/۰۰۰۰
همبستگی رتبه‌ای میانگین کارایی مرحله اول و سوم	میانگین دوره‌ای کشورها	۱۱	۰/۶۹۰۹	۰/۰۲۱۰

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج نشان می‌دهد که ضریب اسپیرمن برای کل داده‌های کشور-سال برابر با ۰/۷۹۸۳ و از نظر آماری معنادار است. همچنین، بر اساس میانگین دوره‌ای کشورها، ضریب اسپیرمن

برابر با ۰/۶۹۰۹ و مقدار احتمال آن برابر با ۰/۰۲۱۰ به دست آمد. بنابراین، میان رتبه‌بندی کارایی در مرحله اول و مرحله سوم رابطه‌ای مثبت و معنادار وجود دارد.

جدول ۱۱. مقایسه رتبه‌بندی میانگین دوره‌ای کارایی کشورها در مرحله اول و مرحله سوم

کشور	میانگین کارایی مرحله اول	رتبه مرحله اول	میانگین کارایی مرحله سوم	رتبه مرحله سوم	تغییر رتبه	قدر مطلق تغییر رتبه
ترکیه	۰/۹۱۷۱	۲	۰/۹۶۱۱	۱	-۱	۱
مصر	۰/۸۰۷۹	۷	۰/۹۵۵۲	۲	-۵	۵
برزیل	۰/۸۹۹۹	۳	۰/۹۲۸۲	۳	۰	۰
مراکش	۰/۸۲۲۹	۶	۰/۹۱۰۱	۴	-۲	۲
چین	۰/۸۵۳۵	۴	۰/۸۸۱۲	۵	۱	۱
هند	۰/۹۲۱۳	۱	۰/۸۴۰۴	۶	۵	۵
مکزیک	۰/۵۶۳۷	۸	۰/۶۷۱۶	۷	-۱	۱
فیلیپین	۰/۸۳۳۱	۵	۰/۶۵۲۹	۸	۳	۳
آفریقای جنوبی	۰/۴۴۵۰	۱۰	۰/۵۳۹۴	۹	-۱	۱
ویتنام	۰/۵۲۲۴	۹	۰/۴۸۷۷	۱۰	۱	۱
ایران	۰/۴۱۲۶	۱۱	۰/۴۸۷۰	۱۱	۰	۰

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج جدول ۱۱ نشان می‌دهد که تعدیل نهاده‌ها، ساختار کلی رتبه‌بندی کشورها را به صورت تصادفی و بی‌ثبات تغییر نداده است. در عین حال، مقدار ضریب اسپیرمن میانگین دوره‌ای نشان می‌دهد که تعدیل محیطی صرفاً یک اصلاح صوری نبوده و جایگاه نسبی برخی کشورها را به طور معنادار تغییر داده است. این یافته با منطق رویکرد سه مرحله‌ای SBM-DEA و مدل مرز تصادفی سازگار است؛ زیرا هدف این رویکرد تفکیک اثر شرایط محیطی و نویز آماری از ناکارایی واقعی است.

همچنین نتایج بیانگر این است که ترکیه، برزیل و ایران پس از تعدیل مرحله سوم جایگاه نسبتاً پایداری داشته‌اند؛ ترکیه از رتبه دوم به رتبه نخست منتقل شده، برزیل در رتبه سوم باقی مانده و ایران همچنان در رتبه یازدهم قرار دارد. در مقابل، مصر و هند بیشترین جابه‌جایی رتبه را تجربه کرده‌اند. مصر پس از تعدیل از رتبه هفتم به رتبه دوم ارتقا یافته، در حالی که هند از رتبه نخست به رتبه ششم منتقل شده است. این جابه‌جایی‌ها نشان

می‌دهد که شرایط محیطی و نويز آماری در برآورد اولیه کارایی برخی کشورها نقش قابل توجهی داشته‌اند. با این حال، معناداری ضریب اسپیرمن نشان می‌دهد که نتایج مرحله سوم از پایداری نسبی برخوردار بوده و رتبه‌بندی نهایی کشورها دچار بی‌ثباتی تصادفی نشده است.

۵. نتیجه‌گیری و توصیه‌های سیاستی

این پژوهش با استفاده از رویکرد سه‌مرحله‌ای DEA-SBM با خروجی نامطلوب نشان داد که ارزیابی کارایی و بهره‌وری در حضور هزینه‌های زیست‌محیطی، تنها زمانی معتبرتر خواهد بود که همزمان سه ملاحظه لحاظ شود: نخست، سنجش غیرشعاعی کارایی با در نظر گرفتن مازادها؛ دوم، کنترل اثر متغیرهای محیطی و نويز؛ سوم، تحلیل پویای کارایی در طول زمان. این منطق با کار کلاسیک تون (۲۰۰۱) درباره مدل SBM، با چارچوب کوپر و همکاران (۲۰۰۶) درباره DEA با خروجی نامطلوب، با رویکرد سه‌مرحله‌ای فرید^۱ و همکاران (۲۰۰۲) و با توسعه شاخص‌های پویای بهره‌وری محیط‌زیستی توسط چیونگ^۲ و همکاران (۱۹۹۷) و او^۳ (۲۰۱۰) همسو است.

نتایج مرحله اول نشان داد که کارایی فنی کشورهای مورد بررسی در تبدیل سرمایه، نیروی کار و انرژی به GDP همراه با کنترل انتشار CO₂ از ناهمگنی قابل توجهی برخوردار است. در این مرحله، هند، ترکیه و برزیل در سطوح بالاتر کارایی قرار داشتند، در حالی که ایران و آفریقای جنوبی در پایین‌ترین سطوح مشاهده شدند. این یافته با ادبیات کاربردی اخیر درباره کارایی انرژی در چارچوب سه‌مرحله‌ای SBM نیز سازگار است؛ برای مثال، ژانگ و چن^۴ (۲۰۲۲) در مطالعه کشورهای RCEP نشان دادند که نتایج کارایی اولیه بین کشورها بسیار ناهمگن است و بدون تعدیل محیطی، ممکن است بخشی از این تفاوت‌ها به اشتباه به عملکرد مدیریتی نسبت داده شود. همچنین مطالعاتی مانند آپرگیس^۵ و همکاران (۲۰۱۵) بر این نکته تأکید دارند که سطح نهاده‌ها به‌تنهایی تعیین‌کننده کارایی نیست و کیفیت استفاده از منابع نقش اصلی را ایفا می‌کند.

-
1. Fried, H.O, Lovell, C.A.K., Schmidt, S.S., & Yaisawarng, S.
 2. Chung, Y.H., Färe, R., & Grosskopf, S.
 3. Oh, D.H.
 4. Zhang, C. & Chen, P.
 5. Apergis, N., Aye, G. C., Barros, C. P., Gupta, R., & Wanke, P.

مرحله دوم نشان داد که بخشی از اسلک‌های نهاده‌ای ریشه در شرایط محیطی و ساختاری دارد. در پژوهش حاضر، GDP سرانه مازاد سرمایه را افزایش داد، شهرنشینی مازاد نیروی کار را کاهش و مازاد انرژی را افزایش داد، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر مازاد انرژی را کاهش داد. این یافته‌ها با نتایج مطالعه فرید و همکاران (۲۰۰۲) کاملاً سازگار است، زیرا آنان نشان دادند که بخشی از عملکرد مشاهده‌شده در DEA در واقع بازتاب محیط بیرونی و نوین است و نه صرفاً کارایی واقعی. از سوی دیگر، نتیجه مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر با شواهد جدیدتر نیز همسو است؛ مطالعاتی مانند آددیس^۱ (۲۰۲۵) و زمان و والیاتور^۲ (۲۰۲۵) نیز نشان می‌دهند که گسترش تجدیدپذیرها و تغییر ترکیب نهاده‌های انرژی می‌تواند به بهبود بهره‌وری سبز و کاهش ناکارایی انرژی کمک کند.

مرحله سوم، که کارایی را پس از تعدیل نهاده‌ها بازبرآورد کرد، مهم‌ترین تصویر از کارایی خالص‌تر کشورها را به دست داد. در این مرحله، ترکیه، مصر و برزیل در صدر کارایی تعدیل‌شده قرار گرفتند و ایران، ویتنام و آفریقای جنوبی در پایین‌ترین سطوح باقی ماندند. این نتیجه اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد که حتی پس از کنترل اثر شرایط محیطی و اختلالات تصادفی، تفاوت‌های معنادار در کارایی کشورها پابرجاست. بنابراین، بخش مهمی از شکاف کارایی را باید به عوامل درون‌زا و ساختاری نسبت داد؛ از جمله کیفیت تخصیص نهاده‌ها، شدت مصرف انرژی، توان جذب فناوری و ظرفیت مدیریت همزمان رشد اقتصادی و مهار انتشار. این نتایج با یافته‌های ژانگ و چن (۲۰۲۲) و مطالعات جدیدتر سه مرحله‌ای مانند هی^۳ و همکاران (۲۰۲۵) سازگار است که تأکید می‌کنند مرحله سوم مبنای معتبرتری برای تحلیل سیاستی است و نه کارایی اولیه مرحله اول.

توصیه‌های سیاستی برای نتایج به دست آمده به صورت زیر است:

- نخست، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در گروه کشورهای کم‌کارتر، ایران، ویتنام و آفریقای جنوبی پایین‌ترین سطوح کارایی تعدیل‌شده را ثبت کردند. این نتیجه نشان می‌دهد که در این کشورها، فاصله از مرز کارا را نمی‌توان صرفاً به شرایط محیطی نسبت داد، بلکه بخشی از آن به ساختار تولید، شدت مصرف انرژی، کیفیت تخصیص نهاده‌ها و ظرفیت جذب فناوری مربوط است. همان‌طور که تون (۲۰۰۱) و سپس بسیاری از مطالعات مبتنی بر SBM تأکید کرده‌اند، مسئله

1. Addis, A. K.

2. Zaman, A. U., & Valiyattoor, V.

3. He, J. Lau, W.Y., & Ng, K.H.

اصلی در بسیاری از موارد چگونگی استفاده از نهاده‌ها است، نه صرفاً حجم آن‌ها. بنابراین، اصلاح تخصیص سرمایه، افزایش بهره‌وری نیروی کار و کاهش شدت مصرف انرژی باید در کانون سیاست‌گذاری قرار گیرد.

دوم، از آنجا که در مرحله دوم سهم انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور معناداری مازاد انرژی را کاهش داد، توسعه تجدیدپذیرها باید به‌عنوان یک سیاست دوگانه اقتصادی-زیست‌محیطی تلقی شود. این نتیجه با مطالعات جدیدی مانند آددیس (۲۰۲۵) نیز همسو است که نشان می‌دهند گذار به سبد انرژی پاک‌تر می‌تواند همزمان به بهبود کارایی و کاهش فشارهای محیط‌زیستی کمک کند. برای کشورهای مورد بررسی، به‌ویژه ایران و آفریقای جنوبی، این به معنای ضرورت اصلاح تدریجی یارانه‌های انرژی، تسهیل سرمایه‌گذاری در تجدیدپذیرها و نوسازی زیرساخت انرژی است.

سوم، چون در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، مصر، فیلیپین و ویتنام، جزء تغییر فناوری پایین‌تر از ۱ بود، سیاست‌گذاری باید به‌طور مستقیم بر تحول فناورانه متمرکز شود. در این زمینه، شواهد اوه (۲۰۱۰) و نیز مطالعات کاربردی اخیر مانند چن و همکاران (۲۰۲۳) و هی و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که بدون جابه‌جایی مثبت مرز فناوری، رشد بهره‌وری در بلندمدت پایدار نخواهد بود. بنابراین، حمایت از تحقیق و توسعه، تسهیل انتقال فناوری‌های پاک، ارتقای استانداردهای صنعتی و توسعه ظرفیت جذب فناوری باید به‌عنوان رکن مکمل اصلاحات کارایی در نظر گرفته شود.

چهارم، اثر دوگانه شهرنشینی در نتایج پژوهش پیام‌سیاستی مهمی دارد. شهرنشینی در سرمایه و نیروی کار به کاهش مازادها کمک کرده، اما در انرژی به افزایش مازاد انجامیده است. این نتیجه نشان می‌دهد که توسعه شهری در صورت نبود زیرساخت مناسب، می‌تواند فشار انرژی و انتشار را تشدید کند. بنابراین، همان‌گونه که مطالعات جدید درباره بهره‌وری انرژی شهری نیز تأکید می‌کنند، سیاست‌های شهری باید بر حمل‌ونقل عمومی کم‌کربن، بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها و نوسازی شبکه‌های شهری استوار باشد تا منافع شهرنشینی حفظ و هزینه‌های انرژی آن مهار شود.

▪ پنجم، برای کشورهایی مانند ترکیه، هند و برزیل که عملکرد بهتری در کارایی نشان داده‌اند، سیاست مناسب فقط حفظ وضع موجود نیست، بلکه تثبیت و تعمیم تجربه موفق است. در ترکیه، هر دو جزء فناوری و کارایی مثبت بوده‌اند؛ بنابراین، این کشور نمونه‌ای از ترکیب موفق اصلاحات عملکردی و تحول فناورانه است. در هند نیز توازن نسبی بین تغییر کارایی و فناوری مشاهده شد؛ لذا تداوم این توازن برای جلوگیری از بازگشت به رکود بهره‌وری اهمیت دارد. چنین تجربه‌هایی می‌تواند برای کشورهای میانی و کم‌کارتر، به‌ویژه در طراحی سیاست‌های انرژی و صنعتی، آموزنده باشد.

ORCID

Akram Akbari

Parviz Mohamadzadeh



<http://orcid.org/0009-0008-1989-5250>



<http://orcid.org/0000-0002-1154-7576>

منابع

- ابراهیمی سالاری، تقی؛ گرجی‌پور، محمدجواد؛ و عثمانی، فریبا. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی زیست‌محیطی بخش صنعت استانی در مصرف گاز طبیعی: کاربرد روش DEA و تابع فاصله جهت‌دار. *پژوهش‌های اقتصاد صنعتی*، ۱۲(۴)، ۲۴-۱۱.
- <https://doi.org/10.30473/indeco.2021.7415>
- بهبودی، داود؛ اکبری، اکرم و احمدزاده دلجوان، فهیمه. (۱۳۹۴). بررسی کارایی انتشار دی‌اکسید کربن بر مبنای مصرف انرژی، *اولین همایش ملی اقتصاد صنعتی ایران*، تبریز، ایران.
- راسخی، سعید؛ و قنبرتبار، سارا. (۱۴۰۲). پویایی جدایی مصرف انرژی، رشد اقتصادی و آلودگی در ایران: شواهد جدید از تحلیل عاملی در سه سطح انرژی. *تحقیقات اقتصادی ایران*، ۲۸(۹۷)، ۴۳-۶.
- <https://doi.org/10.22054/ijer.2024.76778.1233>
- صادقی، سیدکمال؛ اکبری، اکرم و ممی‌پور، سیاب. (۱۳۹۱). بررسی رابطه کوزنتسی در کشورهای اسلامی منتخب با تأکید بر کارایی محیط‌زیست: رهیافت تحلیل پوششی داده‌ها. *اقتصاد انرژی ایران*، ۱(۲)، ۱۴۸-۱۲۷.
- محمدزاده، پرویز؛ اکبری، اکرم و اکبری، امین. (۱۳۹۳). سنجش کارایی اقتصاد دانش‌بنیان در کشورهای منتخب منطقه منا: تحلیل پوششی داده‌ها. *کنفرانس ملی رویکردهای نوین در مدیریت کسب‌وکار*، تبریز، ایران.
- محمدزاده، پرویز؛ و نجار بذوق قره‌چق، هدا. (۱۳۹۳). بررسی تأثیر ICT بر کارایی تولیدی کشورهای در حال توسعه منتخب. *تحقیقات اقتصادی*، ۳(۴۹)، ۶۷۷-۶۹۸.
- <https://doi.org/10.22059/jte.2014.52447>

References

- Addis, A. K. (2025). Sustainability and efficiency analysis of 42 countries: Super SBM-DEA model and the GML productivity index with undesirable outputs. *Ecological Indicators*, 177, 113767. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113767>
- Ang, B. W. (2006). Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy-GDP ratio to composite efficiency index. *Energy Policy*, 34(5), 574–582. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.011>
- Apergis, N., Aye, G. C., Barros, C. P., Gupta, R., & Wanke, P. (2015). Energy efficiency of selected OECD countries: A slacks based model with undesirable outputs. *Energy Economics*, 51, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.007>
- Arabi, B., Munisamy, S., & Emrouznejad, A. (2015). A new slacks-based measure of Malmquist-Luenberger index in the presence of undesirable outputs. *Omega*, 51, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.08.006>
- Behboodi, D., Akbari, A., & Ahmadzadeh Deljavan, F. (2015). Evaluation of carbon dioxide emission efficiency based on energy consumption. In *Proceedings of the First National Conference on Industrial Economics of Iran*, Tabriz, Iran. [In Persian].
- Charnes, A., & Cooper, W. W. (1962). Programming with linear fractional functionals. *Naval Research Logistics Quarterly*, 9(3–4), 181–186. <https://doi.org/10.1002/nav.3800090303>
- Chaubey, V., Mohanta, K. K., & Verma, R. (2026). Measuring performance and productivity of G20 nations in the industrial sector: Enhancing environmental energy efficiency using the global Malmquist-Luenberger DEA approaches. *Sustainable Futures*, 11, 101647. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2026.101647>
- Chen, X., Chen, Y., Huang, W., & Zhang, X. (2023). A new Malmquist-type green total factor productivity measure: An application to China. *Energy Economics*, 117, 106408. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106408>
- Chung, Y. H., Färe, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229–240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2006). *Introduction to data envelopment analysis and its uses: With DEA-Solver software and references*. Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-29122-9>
- Cornillie, J., & Fankhauser, S. (2004). The energy intensity of transition countries. *Energy Economics*, 26(3), 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2004.04.015>
- Ebrahimi Salari, T., Gorjipour, M. J., & Osmani, F. (2020). Evaluating industrial environmental efficiency in natural gas consumption: Application of DEA and directional distance function approaches at

- the provincial level. *Journal of Industrial Economics Researches*, 4(12), 11–24. <https://doi.org/10.30473/indeco.2021.7415> [In Persian].
- Edziah, B. K., & Opoku, E. E. O. (2024). Enhancing energy efficiency in Asia-Pacific: Comprehensive energy policy analysis. *Energy Economics*, 138, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107831>
- Emrouznejad, A., & Yang, G.-L. (2016). A framework for measuring global Malmquist–Luenberger productivity index with CO₂ emissions on Chinese manufacturing industries. *Energy*, 115, 840–856. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.032>
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., & Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84(1), 66–83.
- Fried, H. O., Lovell, C. A. K., Schmidt, S. S., & Yaisawarng, S. (2002). Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 17(1–2), 157–174. <https://doi.org/10.1023/A:1013548723393>
- He, J., Lau, W.-Y., & Ng, K.-H. (2025). A machine learning-enhanced three-stage SBM-DEA model with undesirable outputs for measuring green total factor productivity on a global scale. *Finance Research Letters*, 86, 108611. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.108611>
- Hu, J.-L., & Wang, S.-C. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 34(17), 3206–3217. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.015>
- International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, United Nations Statistics Division, World Bank, & World Health Organization. (2020). *Tracking SDG 7: The energy progress report 2020*. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/344121590675372111/pdf/Tracking-SDG-7-The-Energy-Progress-Report-2020.pdf>
- International Energy Agency. (2024). *Energy efficiency 2024*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
- Li, S., Wu, M., & Song, M. (2023). Analysis of regional differences in green energy efficiency in countries along “the Belt and Road” Initiative zone: Based on super efficiency DEA model and Malmquist index method. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1109045. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1109045>
- Lu, M., Yu, J., Li, F., Zhang, Y., & Jia, Q. (2026). A three-stage evaluation of airline low-carbon competitiveness. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 152, 105173. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105173>
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., & Khoshnoudi, M. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1298–1322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.030>
- Mohamadzadeh, P., & Najjar Bazogh Gharechopogh, H. (2014). The ICT effect on productive efficiency in the selected developing countries.

- Journal of Economic Research*, 49(3), 677–698. <https://doi.org/10.22059/jte.2014.52447> [In Persian].
- Mohamadzadeh, P., Akbari, A., & Akbari, A. (2014). Measuring the efficiency of knowledge-based economy in selected MENA countries: Data envelopment analysis. In *Proceedings of the National Conference on New Approaches in Business Management*, Tabriz, Iran. [In Persian].
- Mohamed, E. F., Abdullah, A., & Jaaffar, A. H. (2024). Energy efficiency in developing countries: A systematic review of current findings and directions towards a net zero economy. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 14(5), 495–508. <https://doi.org/10.32479/ijeep.15719>
- Oh, D.-H. (2010). A global Malmquist–Luenberger productivity index. *Journal of Productivity Analysis*, 34(3), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s11123-010-0178-y>
- Pastor, J. T., & Lovell, C. A. K. (2005). A global Malmquist productivity index. *Economics Letters*, 88(2), 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2005.02.013>
- Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Rasekhi, S., & Ghanbartabar, S. (2023). Decoupling dynamism of energy consumption, economic growth, and pollution in Iran: New evidence from factor analysis at triple levels of energy. *Iranian Journal of Economic Research*, 28(97), 6–43. <https://doi.org/10.22054/ijer.2024.76778.1233> [In Persian].
- Ren, X., Zhang, Z., & Palma, A. (2025). Energy efficiency trends in developing countries: Are we seeing convergence or polarization? *Energy Economics*, 148, 108695. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108695>
- Sadeghi, S. K., Akbari, A., & Mamipour, S. (2012). A study of Kuznets relationship in selected Islamic countries emphasizing environmental efficiency: A data envelopment analysis approach. *Iranian Energy Economics*, 1(2), 127–148. [In Persian].
- Saidi, K., & Omri, A. (2020). The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. *Environmental Research*, 186, 109567. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109567>
- Shah, W. U. H., Zhu, N., Hao, G., Yan, H., & Yasmeen, R. (2024). Energy efficiency evaluation, technology gap ratio, and determinants of energy productivity change in developed and developing G20 economies: DEA super-SBM and MLI approaches. *Gondwana Research*, 125, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.07.017>
- Shu, T., Liao, X., Yang, S., & Yu, T. (2024). Towards sustainability: Evaluating energy efficiency with a super-efficiency SBM-DEA model across 168 economies. *Applied Energy*, 376, 124254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124254>

- Stern, D. I. (2012). Modeling international trends in energy efficiency. *Energy Economics*, 34(6), 2200–2208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.03.009>
- Su, W. (2023). The drivers and barriers of energy efficiency. *Energy Policy*, 178, 113598. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113598>
- Suzuki, S., & Nijkamp, P. (2016). An evaluation of energy-environment-economic efficiency for EU, APEC and ASEAN countries: Design of a target-oriented DFM model with fixed factors in data envelopment analysis. *Energy Policy*, 88, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.007>
- Tang, Y., Ding, H., Shan, X., & Wang, X. (2023). Application of the novel three-stage DEA model to evaluate total-factor energy efficiency: A case study based on 30 provinces and 8 comprehensive economic zones of China. *Results in Engineering*, 20, 101417. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101417>
- Taylor, P. G., d'Ortigue, O. L., Francoeur, M., & Trudeau, N. (2010). Final energy use in IEA countries: The role of energy efficiency. *Energy Policy*, 38(11), 6463–6474. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.009>
- Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498–509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)
- Trotta, G. (2020). Assessing energy efficiency improvements and related energy security and climate benefits in Finland: An ex post multi-sectoral decomposition analysis. *Energy Economics*, 86, 104640. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104640>
- Wang, C.-N., Hsu, H.-P., Wang, Y.-H., & Nguyen, T.-T. (2020). Eco-efficiency assessment for some European countries using slacks-based measure data envelopment analysis. *Applied Sciences*, 10(5), 1760. <https://doi.org/10.3390/app10051760>
- Wang, C.-N., Nguyen, T. T. T., Dang, T.-T., & Hsu, H.-P. (2023). Exploring economic and environmental efficiency in renewable energy utilization: A case study in the Organization for Economic Cooperation and Development countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(28), 72949–72965. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27408-0>
- Wang, C.-N., Nguyen, T. T.-V., Chiang, C.-C., & Le, H.-D. (2024). Evaluating renewable energy consumption efficiency and impact factors in Asia-Pacific Economic Cooperation countries: A new approach of DEA with undesirable output model. *Renewable Energy*, 227, 120586. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120586>
- Wang, L.-W., Le, K.-D., & Nguyen, T.-D. (2019). Assessment of the energy efficiency improvement of twenty-five countries: A DEA approach. *Energies*, 12(8), 1535. <https://doi.org/10.3390/en12081535>
- Xu, G., Feng, S., Guo, S., & Ye, X. (2023). The spatial-temporal evolution analysis of carbon emission of China's thermal power industry based on the three-stage SBM-DEA model. *International Journal of Climate*

- Change Strategies and Management*, 15(2), 247–263.
<https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2022-0115>
- Yan, Y., Chen, Y., Han, M., & Zhen, H. (2022). Research on energy efficiency evaluation of provinces along the Belt and Road under carbon emission constraints: Based on super-efficient SBM and Malmquist index model. *Sustainability*, 14(14), 8453.
<https://doi.org/10.3390/su14148453>
- Yu, D., & He, X. (2020). A bibliometric study for DEA applied to energy efficiency: Trends and future challenges. *Applied Energy*, 268, 115048. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115048>
- Zaman, A. U., & Valiyattoor, V. (2025). Evaluating the green total factor productivity and convergence among emerging and resource intensive economies. *Discover Sustainability*, 6, 1053.
<https://doi.org/10.1007/s43621-025-01614-x>
- Zhang, C., & Chen, P. (2022). Applying the three-stage SBM-DEA model to evaluate energy efficiency and impact factors in RCEP countries. *Energy*, 241, 122917. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122917>
- Zhao, C., Zhang, H., Zeng, Y., Li, F., Liu, Y., Qin, C., & Yuan, J. (2018). Total-factor energy efficiency in BRI countries: An estimation based on three-stage DEA model. *Sustainability*, 10(1), 278.
<https://doi.org/10.3390/su10010278>
- Zheng, L., Zhan, F., & Ren, F. (2025). Carbon dioxide emission-reduction efficiency in China's new energy vehicle sector toward sustainable development: Evidence from a three-stage super-slacks based-measure data envelopment analysis model. *Sustainability*, 17(16), 7440.
<https://doi.org/10.3390/su17167440>
- Zhou, S., & Xu, Z. (2022). Energy efficiency assessment of RCEP member states: A three-stage slack based measurement DEA with undesirable outputs. *Energy*, 253, 124170.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124170>