



Paper Type: Original Article



Mapping Regional Green Development Gaps in Iran: A Dynamic Assessment of Environmental Efficiency and Energy Productivity Across Provinces

Somayeh Koochakzadeh*

Department of Economics, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Vali-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran; s.koochakzadeh@vru.ac.ir.

Citation:



Koochakzadeh, S. (2025). Mapping regional green development gaps in Iran: A dynamic assessment of environmental efficiency and energy productivity across provinces. *Management: Modeling, analysis and applications*, 2(4), 289-301.

Received: 26/03/2025

Reviewed: 18/06/2025

Revised: 21/08/2025

Accepted: 13/10/2025

Abstract

Purpose: Rising energy consumption, increasing environmental pollution, and regional disparities have made sustainable development a major challenge for the Iranian economy. In this context, evaluating provincial performance in terms of environmental efficiency and green productivity can provide valuable insights for regional policymaking and resource allocation. Although numerous studies have examined energy efficiency and environmental performance, limited attention has been devoted to the simultaneous assessment of green efficiency, productivity dynamics, and their determinants across Iranian provinces over an extended period. Therefore, this study aims to analyze the dynamic evolution of green efficiency and productivity across Iranian provinces and identify the factors influencing their performance.

Methodology: This applied research utilized data from 30 Iranian provinces covering the period from 2006 to 2023. Green efficiency was measured using the Slack-Based Measure Data Envelopment Analysis (SBM-DEA) model, where gross domestic product was treated as a desirable output and carbon dioxide emissions as an undesirable output. The Malmquist Productivity Index was employed to evaluate productivity changes over time. Furthermore, a Tobit regression model with time-fixed effects was estimated to identify the determinants of green efficiency. Variables such as energy intensity, industrialization, investment in clean technologies, sanctions, and other structural factors were incorporated into the analysis.

Findings: The results revealed that the average green efficiency score of Iranian provinces was 0.768, and none of the provinces achieved full efficiency. Tehran, Isfahan, and Yazd exhibited the highest efficiency levels, whereas Kurdistan, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad, and Sistan and Baluchestan recorded the weakest performance. The Malmquist analysis indicated a gradual improvement in green productivity over the study period, mainly driven by gains in technical efficiency and technological progress. The Tobit regression results further showed that energy intensity and sanctions have significant negative effects on green efficiency, whereas industrialization and investment in clean technologies have significant positive effects.

Originality/Value: This study integrates environmental efficiency assessment, dynamic productivity analysis, and determinant evaluation within a unified analytical framework to provide a comprehensive picture of green performance across Iranian provinces. Its primary contribution lies in revealing regional disparities in green development and disentangling the respective roles of managerial improvements and technological progress in productivity enhancement. The findings offer practical implications for policymakers seeking to reduce energy intensity, promote clean technologies, and foster more balanced and sustainable regional development.

Keywords: Data envelopment analysis, SBM model, Green productivity, Malmquist Index.



Corresponding Author: s.koochakzadeh@vru.ac.ir

<https://doi.org/10.22105/mmaa.v2i4.115>

Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



۶

نوع مقاله: پژوهشی

پایش شکاف های منطقه ای در توسعه سبز ایران: ارزیابی پویای کارایی زیست محیطی و بهره وری انرژی استان ها

سمیه کوچک زاده*

گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

چکیده

هدف: افزایش مصرف انرژی، تشدید آلودگی های زیست محیطی و نابرابری های منطقه ای، دستیابی به توسعه پایدار را به یکی از چالش های اساسی اقتصاد ایران تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، ارزیابی عملکرد استان ها از منظر کارایی زیست محیطی و بهره وری سبز می تواند مبنای مهمی برای سیاست گذاری های منطقه ای و تخصیص بهینه منابع باشد. با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه کارایی انرژی و محیط زیست، بررسی همزمان کارایی سبز، تغییرات بهره وری و عوامل اثرگذار بر آن در سطح استان های ایران طی یک دوره زمانی بلندمدت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، این پژوهش با هدف تحلیل پویای کارایی و بهره وری سبز استان های ایران و شناسایی عوامل موثر بر آن انجام شد.

روش شناسی پژوهش: این پژوهش کاربردی با استفاده از داده های ۳۰ استان ایران در دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۲ انجام شد. برای سنجش کارایی سبز، مدل تحلیل پوششی داده ها مبتنی بر اسلک با در نظر گرفتن تولید ناخالص داخلی به عنوان خروجی مطلوب و انتشار دی اکسید کربن به عنوان خروجی نامطلوب به کار گرفته شد. همچنین برای بررسی تغییرات بهره وری در طول زمان از شاخص بهره وری مالم کوئیست استفاده شد. در ادامه، به منظور شناسایی عوامل موثر بر کارایی سبز، مدل رگرسیون توییت با اثرات ثابت زمانی برآورد گردید. متغیرهای شدت انرژی، صنعتی شدن، سرمایه گذاری در فناوری های پاک، تحریم ها و برخی متغیرهای ساختاری در تحلیل لحاظ شدند.

یافته ها: نتایج نشان داد میانگین کارایی سبز استان های ایران برابر با ۰/۷۶۸ بوده و هیچ یک از استان ها به مرز کارایی کامل دست نیافته اند. استان های تهران، اصفهان و یزد بالاترین سطوح کارایی را ثبت کردند، در حالی که استان های کردستان، کهگیلویه و بویراحمد و سیستان و بلوچستان پایین ترین عملکرد را داشتند. همچنین نتایج شاخص مالم کوئیست بیانگر رشد تدریجی بهره وری سبز در دوره مورد بررسی بود که عمدتاً از بهبود کارایی فنی و پیشرفت های فناورانه ناشی شده است. یافته های رگرسیون توییت نیز نشان داد شدت انرژی و تحریم ها اثر منفی و معنادار و صنعتی شدن و سرمایه گذاری در فناوری های پاک اثر مثبت و معنادار بر کارایی سبز دارند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: این پژوهش با تلفیق تحلیل کارایی زیست محیطی، ارزیابی پویای بهره وری و تحلیل عوامل موثر در یک چارچوب واحد، تصویری جامع از عملکرد سبز استان های ایران ارائه می کند. ارزش افزوده اصلی مطالعه در آشکارسازی شکاف های منطقه ای توسعه سبز و تفکیک نقش بهبودهای مدیریتی از پیشرفت های فناورانه در ارتقای بهره وری است. نتایج پژوهش می تواند به سیاست گذاران در طراحی برنامه های منطقه ای کاهش شدت انرژی، توسعه فناوری های پاک و بهبود توازن زیست محیطی میان استان های کشور کمک کند.

کلیدواژه ها: تحلیل پوششی داده ها، مدل SBM، بهره وری سبز، شاخص مالم کوئیست.

۱- مقدمه

طرح های ملی و بین المللی مرتبط با مباحث انرژی و محیط زیست معمولاً به منظور ارائه راهکارهایی موثر برای صرفه جویی در مصرف منابع و کاهش میزان آلاینده ها اجرا می شوند [1]. در این راستا، یکی از موارد با اهمیت، حفظ سطح تولید ناخالص داخلی و جلوگیری از اتلاف بهره وری

می‌باشد. بخش انرژی به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی هر کشور، نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند. با این حال، فعالیت‌های مرتبط با تولید و مصرف انرژی، پیامدهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی را به‌همراه دارد. این پیامدها نه‌تنها سلامت عمومی جامعه را تهدید می‌کند، بلکه هزینه‌های سنگینی را بر نظام سلامت و اقتصاد کشور تحمیل می‌نماید [2].

در دهه‌های اخیر، مفهوم «کارایی و بهره‌وری سبز» مورد توجه ویژه پژوهشگران و سیاست‌گذاران قرار گرفته است. این مفهوم بر توانایی واحدهای تولیدی در حداکثرسازی خروجی‌های مطلوب و حداقل‌سازی خروجی‌های نامطلوب با استفاده از مقدار معینی از ورودی‌ها تأکید دارد. سازمان‌های بین‌المللی نظیر آژانس بین‌المللی انرژی، بهبود کارایی زیست‌محیطی را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای دستیابی به اهداف توسعه پایدار معرفی کرده‌اند. ایران با دارا بودن ذخایر عظیم نفت و گاز، یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی در جهان است. آمارها نشان می‌دهد که شدت انرژی در ایران حدود ۸ تا ۱۰ برابر میانگین جهانی است و انتشار سرانه CO_2 نیز بالاتر از متوسط جهانی قرار دارد [3].

بررسی وضعیت مصرف انرژی در ایران نشان می‌دهد که نیروگاه‌های حرارتی با راندمان متوسط ۳۸٪ نقش اصلی را در تولید برق کشور ایفا می‌کنند. این نیروگاه‌ها عمدتاً از گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند که انتشار قابل‌توجه آلاینده‌ها را به‌همراه دارد. صنعت برق ایران سهم قابل‌توجهی در انتشار CO_2 ، SO_2 و NOx دارد که پیامدهای ناگواری برای سلامت عمومی و محیط زیست به‌دنبال داشته است. در کنار چالش‌های فوق، توزیع نابرابر منابع و زیرساخت‌های انرژی در سطح استان‌های کشور، مسأله‌ای است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برخی استان‌ها نظیر تهران، اصفهان و خوزستان از زیرساخت‌های انرژی پیشرفته‌تری برخوردارند، در حالی که استان‌های مرزی و کمتر توسعه‌یافته با کمبود زیرساخت‌ها مواجه هستند [4].

در چنین شرایطی، ارزیابی دقیق و علمی کارایی و بهره‌وری سبز استان‌های ایران می‌تواند ضمن شناسایی نقاط قوت و ضعف مناطق مختلف، زمینه‌ساز تخصیص بهینه منابع و تدوین سیاست‌های هدفمند برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی شود. روش تحلیل پوششی داده‌ها^۱ به‌عنوان یک رویکرد ناپارامتریک مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی، یکی از کارآمدترین ابزارها برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده^۲ محسوب می‌شود. در این میان، مدل SBM^3 که توسط تون [5] معرفی شد به دلیل ماهیت غیرشعاعی و توانایی لحاظ‌کردن همزمان خروجی‌های مطلوب و نامطلوب برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی بسیار مناسب است. همچنین شاخص بهره‌وری مالم کوئیست^۴ این امکان را فراهم می‌کند تا تغییرات بهره‌وری در طول زمان مورد بررسی قرار گیرد و سهم بهبود مدیریتی از پیشرفت فناوریانه تفکیک شود [6]. با توجه به شکاف تحقیقاتی موجود در زمینه تحلیل پویای کارایی و بهره‌وری سبز استان‌های ایران، این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی استان‌ها با لحاظ همزمان خروجی مطلوب (تولید ناخالص داخلی) و خروجی نامطلوب (انتشار CO_2) و همچنین بررسی تغییرات بهره‌وری طی دوره ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۲ با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها مبتنی بر اسلک^۵ و شاخص مالم کوئیست انجام شده است.

۲- مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱- DEA با خروجی نامطلوب

DEA یک روش ناپارامتریک مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی است که برای اولین بار توسط چارنز و همکاران [7] با معرفی مدل CCR مطرح شد. این روش برای ارزیابی کارایی نسبی DMU که دارای ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد هستند، به‌کار گرفته می‌شود. مفهوم اصلی در DEA ، ایجاد مرزی از بهترین عملکردها (مرز کارایی) و مقایسه سایر واحدها با این مرز است؛ واحدهای روی مرز کارا و واحدهای خارج از مرز ناکارا محسوب می‌شوند. در مدل‌های سنتی DEA ، فرض بر این است که تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها مطلوب هستند، به این معنا که کاهش ورودی‌ها و افزایش خروجی‌ها همواره مطلوب تلقی می‌شود. با این حال، در بسیاری از فرایندهای تولیدی واقعی، به‌ویژه در صنایع انرژی‌بر، علاوه بر خروجی‌های مطلوب (مانند محصولات تولیدی)، خروجی‌های نامطلوب (مانند آلاینده‌های زیست‌محیطی) نیز تولید می‌شوند که هدف کاهش آن‌هاست. برای

¹ Data Envelopment Analysis (DEA)

² Decision Making Units (DMU)

³ Slack-based measure

⁴ Malmquist productivity index

⁵ Slack-Based Measure Data Envelopment Analysis (SBM-DEA)

لحاظ‌کردن خروجی‌های نامطلوب در *DEA*، رویکردهای مختلفی توسعه یافته است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها مدل *SBM* است. مدل *SBM* که توسط تون [5] معرفی شد، یک مدل ناردیال است که برخلاف مدل‌های شعاعی، به‌طور مستقیم با اضافه‌برداری‌ها (مازاد ورودی‌ها یا کمبود خروجی‌ها) سروکار دارد و با در نظر گرفتن همزمان اضافه‌برداری ورودی‌ها، کمبود خروجی‌های مطلوب و اضافه‌برداری خروجی‌های نامطلوب، امکان ارزیابی دقیق‌تری از کارایی واحدها فراهم می‌کند. در ادبیات *DEA* ایران، مطالعات متعددی به موضوع خروجی‌های نامطلوب پرداخته‌اند. عزیزی و همکاران [8] با ارایه رویکرد *DEA* با مرزهای کارا و ناکارا، روشی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان در حضور خروجی‌های نامطلوب و داده‌های نادقیق ارایه دادند. همچنین، امیرتیموری و همکاران [9] مدل‌های ریاضی مختلفی برای لحاظ‌کردن عوامل نامطلوب در *DEA* را توسعه داده‌اند.

۲-۲- شاخص بهره‌وری مالم کوئیست

شاخص بهره‌وری مالم کوئیست نخستین بار توسط کاوس و همکاران [6] و بر پایه مفهوم تابع فاصله^۱ امکان اندازه‌گیری تغییرات بهره‌وری کل^۲ معرفی شد. این شاخص در چارچوب *DEA* امکان اندازه‌گیری تغییرات بهره‌وری کل عوامل^۳ را در طول زمان فراهم می‌کند، بدون آنکه نیاز به تصریح شکل تابع تولید یا فروض رفتاری خاصی مانند بهینه‌یابی وجود داشته باشد. به بیان دیگر، شاخص مالم کوئیست با مقایسه موقعیت *DMU* در دو دوره زمانی متوالی نسبت به مرز کارایی تولید، میزان پیشرفت یا پسرفت بهره‌وری را محاسبه می‌کند [10]. از نظر مفهومی، این شاخص تغییرات بهره‌وری را به دو مولفه اصلی تفکیک می‌کند: ۱- تغییرات کارایی فنی^۴ که نشان می‌دهد یک واحد تا چه حد در طول زمان به مرز کارایی نزدیک‌تر یا از آن دورتر شده است و افزایش آن به معنای بهبود مدیریت، تخصیص بهتر منابع یا کاهش اتلاف‌هاست [4] و ۲- تغییرات فناوری^۵ که بیانگر جابه‌جایی خود مرز تولید در طول زمان بوده و نشان می‌دهد آیا فناوری تولید، چارچوب نهادی و زیرساختی به‌سمت استفاده کارا تر از نهاده‌ها حرکت کرده یا دچار رکود شده است [11]. حاصل ضرب این دو مولفه، تغییرات *TFP* را تشکیل می‌دهد؛ به‌طوری‌که اگر مقدار شاخص کل بزرگ‌تر از یک باشد، نشان‌دهنده رشد بهره‌وری و اگر کمتر از یک باشد، بیانگر کاهش بهره‌وری است [2]. در مطالعات داخلی، شاخص مالم کوئیست به‌طور گسترده برای ارزیابی پویای بهره‌وری در بخش‌هایی نظیر بانکداری، صنعت برق، شرکت‌های آب و فاضلاب و طرح‌های محیط زیستی به‌کار رفته است. برای نمونه، مطالعه سرخیل و همکاران [1] با عنوان «تحلیل کارایی و بهره‌وری طرح‌های کلان انرژی و محیط زیست با استفاده از روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها (*DEA*)» نشان داد که در طرح هدفمندی یارانه‌های انرژی ایران، رشد بهره‌وری محیط زیستی از جنبه کارایی فنی حدود ۵۶/۷٪ افزایش یافته، در حالی که مولفه فناوری حدود ۱۱/۵۸٪ کاهش داشته است. این نتایج بیانگر آن است که اگرچه مدیریت و استفاده از منابع بهبود یافته، اما پیشرفت فناورانه یا نوآوری‌های ساختاری کافی برای جابه‌جایی مرز تولید رخ نداده است و بنابراین تحلیل همزمان هر دو مولفه برای ارایه توصیه‌های سیاستی ضروری است. در پژوهش حاضر با عنوان «تحلیل پویای کارایی و بهره‌وری سبز استان‌های ایران با استفاده از مدل *SBM-DEA* و شاخص مالم کوئیست»، شاخص مالم کوئیست در کنار مدل *SBM-DEA* به‌کار گرفته می‌شود تا علاوه بر لحاظ‌کردن ناکارایی‌های ناشی از مازاد نهاده‌ها و کمبود ستانده‌های مطلوب، اثر ستانده‌های نامطلوب (نظیر انتشار آلاینده‌ها) نیز در چارچوبی پویا ارزیابی شود [12]. ترکیب مدل *SBM* با شاخص مالم کوئیست این امکان را فراهم می‌کند که ۱- تغییرات کارایی سبز استان‌ها در گذر زمان سنجیده شود [8]، ۲- سهم بهبود مدیریتی (نزدیک‌شدن به مرز) از سهم پیشرفت فناورانه (جابه‌جایی مرز) تفکیک گردد [4] و ۳- مشخص شود رشد یا افت بهره‌وری ناشی از اصلاح الگوی مصرف انرژی است یا از تغییر فناوری‌های پاک و کارا تر ناشی می‌شود [13]. به این ترتیب، چارچوب تحلیلی پژوهش نه تنها وضعیت نسبی استان‌ها را در هر سال نشان می‌دهد، بلکه مسیر حرکت آن‌ها را در طول زمان نیز تبیین می‌کند و مبنایی مناسب برای طراحی سیاست‌های منطقه‌ای در حوزه انرژی و محیط زیست فراهم می‌آورد.

۲-۳- پیشینه تحقیق

پیشینه تحقیق نقش مهمی در شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی و آشنایی با روش‌های مطالعات پیشین دارد. بررسی مطالعات داخلی و خارجی مرتبط با «تحلیل پویای کارایی و بهره‌وری انرژی-زیست محیطی» نشان می‌دهد این حوزه در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه قرار گرفته است. توسعه

¹ Distance function

² Total Factor Productivity Change (TFPCH)

³ Total Factor Productivity (TFP)

⁴ Efficiency Change

⁵ Technological Change (TC)

مدل‌های *DEA* برای لحاظ کردن خروجی‌های نامطلوب و به‌کارگیری شاخص‌های پویای بهره‌وری مانند مالم کوئیست، امکان ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد زیست‌محیطی واحدهای اقتصادی فراهم کرده است. در ادامه، مهم‌ترین مطالعات داخلی و خارجی در این زمینه مرور می‌شود.

۲-۳-۱- مطالعات داخلی

اعظمی و اژند [14] با استفاده از شاخص بهره‌وری مالم کوئیست غیرشعاعی فرامرزی (*MNMCPI*) و لحاظ انتشار CO_2 به‌عنوان خروجی نامطلوب، تغییرات بهره‌وری زیست‌محیطی استان‌های ایران را طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷ بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین تأثیرپذیری بهره‌وری زیست‌محیطی از اثر ابداعات و کمترین آن از اثر کارایی است. همچنین تحلیل فضایی حاکی از وجود اثر سرریز مثبت بهره‌وری زیست‌محیطی استان‌ها بر استان‌های همجوار بود. زارعی محمودآبادی و نوروزی آورگانی [15] با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های پنجره‌ای فازی^۱ و لحاظ خروجی نامطلوب، کارایی زیست‌محیطی ۲۹ استان کشور را طی چهار دوره زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که استان آذربایجان شرقی با کارایی ۰/۸۳۷ بهترین عملکرد و استان هرمزگان با کارایی ۰/۳۳۳ بدترین عملکرد را داشته‌اند. استان‌های تهران، اصفهان و یزد نیز در رتبه‌های بالای کارایی قرار گرفتند. عثمانی و همکاران [16] با استفاده از روش *DEA* و شاخص مالم کوئیست، کارایی زیست‌محیطی بخش‌های کشاورزی، نفت، صنعت، معدن، حمل‌ونقل و خدمات ایران را طی دوره ۱۳۷۵-۱۳۹۷ ارزیابی کردند. در این پژوهش انتشار CO_2 ، SO_2 و NOx به‌عنوان خروجی‌های نامطلوب و ارزش افزوده هر بخش به‌عنوان خروجی مطلوب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بخش‌های کشاورزی و نفت کارا و بخش حمل‌ونقل ناکاراترین بخش از نظر زیست‌محیطی است. حسینی [4] با استفاده از مدل *DEA* و شاخص مالم کوئیست به اندازه‌گیری تغییرات بهره‌وری در شرکت‌های مدیریت تولید برق ایران طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۷ پرداخت. نتایج نشان داد که متوسط نرخ رشد بهره‌وری کل در این دوره برابر ۱/۰۴ بوده که از افزایش در هر دو عامل کارایی عملکردی و کارایی فناوری ناشی می‌شود. متقی [17] در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود با عنوان «تحلیل کارایی زیست‌محیطی و بهره‌وری سیزده صنایع کارخانه‌ای ایران به روش تحلیل پوششی داده‌ها و شاخص مالم کوئیست» به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی صنایع کارخانه‌ای ایران پرداخت. در این مطالعه، صنایع مختلف از نظر عملکرد زیست‌محیطی رتبه‌بندی و نقاط ضعف و قوت هر یک شناسایی شد. ممی‌پور و نجف‌زاده [18] با استفاده از مدل مازاد مبنا (*SBM*) و تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (*NDEA*) به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی شرکت‌های برق منطقه‌ای ایران پرداختند. نتایج نشان داد که بخش تولید بیش از دو بخش دیگر بر کارایی کل تأثیر می‌گذارد و شرکت خوزستان بالاترین کارایی و شرکت غرب بدترین عملکرد را داشته است. سرخیل و همکاران [1] با استفاده از تکنیک‌های ورودی *DEA* و لحاظ خروجی نامطلوب، بهره‌وری دو طرح بزرگ محیط زیستی ایران شامل هدفمندی یارانه‌های انرژی و تصفیه فاضلاب کلانشهر تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد در طرح هدفمندی یارانه‌ها، رشد بهره‌وری محیط زیستی از جنبه فنی حدود ۷/۵۶٪ افزایش و از جنبه فناوری حدود ۱۱/۵۸٪ کاهش داشته است. عزیزی و همکاران [8] با ارایه رویکرد *DEA* با مرزهای کارا و ناکارا، روشی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان در حضور خروجی‌های نامطلوب و داده‌های نادقیق ارایه دادند. این رویکرد با ایجاد دو مرز مجزا (خوش‌بینانه و بدبینانه) امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از عملکرد تأمین‌کنندگان فراهم می‌کند.

۲-۳-۲- مطالعات خارجی

کوسوماواردانی [19] با استفاده از رویکرد *DEA* به ارزیابی کارایی زیست‌محیطی کشورهای جنوب شرق آسیا در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۲ پرداخت. نتایج نشان داد که سنگاپور کاراترین کشور است و اندونزی نیازمند تمرکز بر بهبود کارایی زیست‌محیطی خود می‌باشد. دای و همکاران [20] به بررسی رابطه بین تجارت دیجیتال، بازبودن تجاری، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی و بهره‌وری سبز کل عوامل پرداختند. نتایج نشان داد که تجارت دیجیتال از طریق تسهیل انتقال فناوری و بهبود کارایی منابع، تأثیر مثبت و معناداری بر بهره‌وری سبز دارد. دو و همکاران [21] با بررسی نقش توجه دولت به مسایل زیست‌محیطی بر بهره‌وری سبز نشان دادند که مقررات و سیاست‌های حمایتی دولت نقش مهمی در بهبود بهره‌وری سبز ایفا می‌کند. ون و همکاران [22] تأثیر بیمه زیست‌محیطی بر بهره‌وری سبز را در سطح بنگاه‌های چینی بررسی کردند و نشان دادند که این ابزار مالی می‌تواند انگیزه‌های لازم برای کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و بهبود کارایی را فراهم کند. یان و همکاران [23] در مطالعه‌ای با عنوان «مالیات‌های حفاظت از محیط زیست و بهره‌وری سبز» نشان دادند که مالیات‌های زیست‌محیطی اثر مثبت بر بهره‌وری سبز دارند، اما این اثر در مناطق مختلف به دلیل تفاوت در ساختار صنعتی و ظرفیت‌های نهادی متفاوت است. جادون و همکاران [24] با استفاده از شاخص مالم کوئیست-لوتنبرگر به برآورد کارایی

¹ Fuzzy Window Data Envelopment Analysis (FWDEA)

زیست‌محیطی کشورهای منطقه آسیا-اقیانوسیه طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ پرداختند. نتایج نشان داد که کارایی زیست‌محیطی این کشورها به طور متوسط ۰/۳۶٪ کاهش یافته و کره جنوبی بالاترین نرخ رشد بهره‌وری را داشته است. دنگ و همکاران [25] به بررسی اقتصاد دیجیتال و اثرات فضایی آن بر بهره‌وری سبز در صنعت تولید چین پرداختند. نتایج نشان داد که اقتصاد دیجیتال دارای اثر سرریز فضایی مثبت بر بهره‌وری سبز است و می‌تواند از طریق کانال‌های نوآوری و بهبود کارایی منابع، عملکرد زیست‌محیطی را ارتقا دهد. لی و لی [26] در مطالعه‌ای با عنوان «چگونه تامین مالی سبز بر بهره‌وری کل عوامل سبز تاثیر می‌گذارد؟ شواهدی از چین» نشان دادند که توسعه مالی سبز از طریق هدایت سرمایه به سمت پروژه‌های پاک و پایدار، می‌تواند به بهبود بهره‌وری سبز کمک کند. گومز-کالوت و همکاران [27] با استفاده از مدل *SBM* با خروجی نامطلوب و رویکرد ابرکارایی، کارایی زیست‌محیطی تولید برق و حرارت در کشورهای اتحادیه اروپا را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های *SBM* با خروجی نامطلوب ابزاری موثر برای شناسایی کشورهای تاثیرگذار در بهبود کارایی انرژی هستند. یانگ و فانگ [28] با استفاده از مدل *SBM-DEA* و رگرسیون توبیت^۱، بهره‌وری سبز شرکت‌های املاک در چین را بررسی کردند و نشان دادند که اندازه شرکت و ساختار مالکیت از عوامل موثر بر بهره‌وری سبز هستند. گوسال و همکاران [29] با استفاده از شاخص ترتیبی مالم کوئیست-لوتنبرگر و در نظر گرفتن آلاینده‌های هوا و آب به عنوان خروجی نامطلوب، رشد بهره‌وری سبز را در صنعت خمیر و کاغذ سوئد بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که مقررات زیست‌محیطی باعث تحریک *TC* مرتبط با کنترل آلودگی شده است. سیفورد و ژو [13] روشی برای تبدیل خروجی‌های نامطلوب به خروجی‌های مطلوب در *DEA* ارائه دادند که در مطالعات بعدی مورد استفاده گسترده قرار گرفت.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش جامعی در زمینه تحلیل پویای کارایی و بهره‌وری سبز استان‌های ایران با استفاده از ترکیب مدل غیرشعاعی *SBM* (با قابلیت لحاظ خروجی نامطلوب) و شاخص مالم کوئیست در یک دوره ۱۸ ساله (۱۴۰۲-۱۳۸۵) که رویدادهای مهمی مانند هدفمندی یارانه‌ها، تحریم‌ها، کرونا و ناترازی انرژی را پوشش دهد، وجود ندارد. نوآوری این پژوهش در به کارگیری این چارچوب روش‌شناختی پیشرفته برای تفکیک تغییرات کارایی فنی از *TC* و همچنین تحلیل عوامل موثر بر کارایی با استفاده از رگرسیون توبیت است تا شکاف‌های منطقه‌ای و سیاستی در حوزه انرژی-زیست‌محیطی (سبز) کشور شناسایی شود.

۳- روش‌شناسی

این پژوهش از نوع توصیفی-تحلیلی و با هدف کاربردی انجام شده است. جامعه آماری شامل ۳۰ استان کشور در دوره زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۲ می‌باشد. لازم به توضیح است که استان البرز در سال ۱۳۸۹ از استان تهران منتزع گردید و به دلیل فقدان آمار مستقل برای این استان در سال‌های ابتدایی دوره (۱۳۸۸-۱۳۸۵) و عدم امکان دسترسی به داده‌های کامل و همگن در طول دوره ۱۸ ساله، این استان از نمونه حذف شده است. انتخاب این بازه زمانی به دلیل همزمانی با تحولات مهم بخش انرژی، از جمله اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها از سال ۱۳۸۹، توسعه تدریجی انرژی‌های تجدیدپذیر و تغییرات فناورانه در بخش تولید بوده است؛ بنابراین دوره مورد بررسی امکان تحلیل پویای عملکرد استان‌ها پیش و پس از اصلاحات ساختاری را فراهم می‌کند. در این مطالعه، هر استان در هر سال به عنوان یک *DMU* در نظر گرفته شده است.

۱-۳- متغیرهای پژوهش

ساختار تولید سبز استان‌ها با استفاده از مجموعه‌ای از نهاده‌ها، یک ستانده مطلوب و یک ستانده نامطلوب مدلسازی شده است. انتخاب متغیرها بر اساس مبانی نظری و مطالعات پیشین [1]، [2]، [5] صورت گرفته است.

¹ Tobit regression

جدول ۱- متغیرهای ورودی (نهاده‌ها).
Table 1- Input variables (institutions).

متغیر	واحد	منبع داده	توضیحات
مصرف کل انرژی	هزار بشکه معادل نفت خام	ترازنامه انرژی وزارت نیرو	مجموع مصرف نهایی انرژی شامل فرآورده‌های نفتی، گاز طبیعی و برق
نیروی کار	هزار نفر	مرکز آمار ایران	جمعیت شاغل استان
موجودی سرمایه	میلیارد ریال (قیمت‌های ثابت ۱۳۹۰)	بانک مرکزی و مرکز آمار	برآورد شده با روش موجودی دائمی ^۱
مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر	هزار بشکه معادل نفت خام	سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر (ساتبا)	شامل انرژی خورشیدی، بادی و برق آبی

جدول ۲- متغیرهای خروجی (ستانده‌ها).
Table 2- Output variables (outputs).

متغیر	نوع	واحد	منبع داده	توضیحات
تولید ناخالص داخلی	مطلوب	میلیارد ریال (قیمت‌های ثابت ۱۳۹۰)	مرکز آمار ایران	ارزش افزوده ایجاد شده در استان
انتشار CO ₂	نامطلوب	هزار تن	محاسبات پژوهشگر بر اساس ضرایب انتشار IPCC (2006) محاسبه شده است.	

برای محاسبه انتشار CO₂ از ضرایب ارایه شده توسط هیات بین‌الدولی تغییرات اقلیمی (IPCC, 2006) استفاده شده است؛ این ضرایب به صورت خطی برای هر نوع سوخت به شرح زیر است: هر لیتر بنزین ۲/۳۱ کیلوگرم CO₂، هر لیتر گازوئیل ۲/۶۸ کیلوگرم CO₂، هر مترمکعب گاز طبیعی ۱/۹۵ کیلوگرم CO₂ و هر لیتر نفت کوره ۳/۱۱ کیلوگرم CO₂ [30].

۳-۲- روش تحلیل کارایی: مدل SBM با خروجی نامطلوب

برای اندازه‌گیری کارایی سبز استان‌ها از مدل SBM با فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس^۲ استفاده شده است. مدل SBM که توسط تون [5] معرفی شد، به دلیل ماهیت غیرشعاعی و توانایی لحاظ کردن همزمان خروجی‌های مطلوب و نامطلوب، برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی بسیار مناسب است.

فرمولاسیون ریاضی مدل SBM با خروجی نامطلوب به صورت زیر است:

$$\rho = \min (1 - (1/m) \Sigma (s_i^- / x_{i0})) / (1 + (1/(s_1 + s_2)) (\Sigma (s_r^g / y_{r0}^g) + \Sigma (s_t^b / y_{t0}^b))),$$

$$s.t.$$

$$x_0 = X\lambda + s^-,$$

$$y_0^g = Y^g\lambda - s^g,$$

$$y_0^b = Y^b\lambda + s^b,$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0,$$
(۱)

که در آن

۱. ρ : کارایی SBM (مقداری بین صفر و یک)

^۱ Perpetual inventory method

^۲ Variable Returns to Scale (VRS)

۲. m : تعداد ورودی‌ها
۳. S_1 : تعداد خروجی‌های مطلوب
۴. S_2 : تعداد خروجی‌های نامطلوب
۵. S^- : بردار اضافه‌برداری ورودی‌ها (میزان مصرف اضافی)
۶. S^g : بردار کمبود خروجی‌های مطلوب (میزان تولید کمتر از حد امکان)
۷. S^b : بردار اضافه‌برداری خروجی‌های نامطلوب (میزان آلاینده‌گی اضافی)
۸. X_0 : بردار ورودی‌های واحد مورد بررسی
۹. Y_0^g : بردار خروجی‌های مطلوب واحد مورد بررسی
۱۰. Y_0^b : بردار خروجی‌های نامطلوب واحد مورد بررسی
۱۱. X : ماتریس ورودی‌ها
۱۲. Y^g : ماتریس خروجی‌های مطلوب
۱۳. Y^b : ماتریس خروجی‌های نامطلوب
۱۴. λ : بردار وزن‌ها

در این چارچوب، افزایش تولید ناخالص داخلی (خروجی مطلوب) و کاهش انتشار CO_2 (خروجی نامطلوب) به‌عنوان بهبود عملکرد تلقی می‌شود. امتیاز کارایی هر استان در هر سال عددی بین صفر و یک است که مقدار یک نشان‌دهنده قرارگرفتن بر مرز کارایی (عملکرد کاملاً کارا) می‌باشد.

۳-۳- تحلیل پویای بهره‌وری: شاخص مالم کوئیست

به‌منظور بررسی تغییرات بهره‌وری در طول زمان، شاخص بهره‌وری مالم کوئیست مبتنی بر تابع فاصله جهت^۱ محاسبه شده است [2]، [6]. این شاخص تغییرات TFP را بین دو دوره متوالی اندازه‌گیری کرده و به دو مولفه اصلی تفکیک می‌شود:

۱. EC : این مولفه نشان می‌دهد که یک استان تا چه حد در طول زمان به مرز کارایی نزدیک‌تر یا از آن دورتر شده است. افزایش این شاخص به معنای بهبود مدیریت، تخصیص بهتر منابع و کاهش اتلاف‌هاست.
۲. TC : این جزء بیانگر جابه‌جایی خود مرز تولید در طول زمان بوده و نشان می‌دهد که آیا فناوری تولید، زیرساخت‌ها و دانش فنی به‌سمت استفاده کاراتر از نهاده‌ها حرکت کرده یا دچار رکود شده است.

شاخص بهره‌وری مالم کوئیست برای دوره t تا $t+1$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$M(x^t, y^{g,t}, y^{b,t}, x^{t+1}, y^{g,t+1}, y^{b,t+1}) = \frac{[D^t(x^t, y^{g,t}, y^{b,t}) / D^t(x^{t+1}, y^{g,t+1}, y^{b,t+1})] \times [D^{t+1}(x^{t+1}, y^{g,t+1}, y^{b,t+1}) / D^{t+1}(x^t, y^{g,t}, y^{b,t})]^{1/2}}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{g,t+1}, y^{b,t+1}) / D^{t+1}(x^t, y^{g,t}, y^{b,t})} \quad (2)$$

حاصل ضرب دو مولفه EC و TC ، $TFPCH$ را تشکیل می‌دهد.

$$TFPCH = EC \times TC \quad (3)$$

تفسیر نتایج شاخص مالم کوئیست به‌صورت زیر است:

۱. $TFPCH > 1$: رشد بهره‌وری در دوره مورد بررسی

¹ Directional distance function

۲. $TFPCH = 1$: ثبات بهره‌وری

۳. $TFPCH < 1$: کاهش بهره‌وری

۳-۴- تحلیل عوامل موثر بر کارایی: رگرسیون توبیت

در گام بعد، برای شناسایی عوامل موثر بر کارایی سبز استان‌ها، از مدل رگرسیون توبیت با اثرات ثابت زمانی^۱ استفاده شده است. به دلیل آنکه متغیر وابسته (امتیاز کارایی) در بازه (۰،۱) محدود است و ماهیت سانسور شده^۲ دارد، استفاده از مدل توبیت نسبت به رگرسیون خطی معمولی^۳ مناسب‌تر است [4].

مدل توبیت با ساختار زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}
 Efficiency_{it}^* &= \beta_0 + \beta_1 X_{1it} + \beta_2 X_{2it} + \dots + \beta_n X_{nit} + \gamma_t + \varepsilon_{it} \\
 Efficiency_{it} &= Efficiency_{it}^* \quad \text{if } 0 < Efficiency_{it}^* < 1, \\
 Efficiency_{it} &= 0, \quad \text{if } Efficiency_{it}^* \leq 0, \\
 Efficiency_{it} &= 1, \quad \text{if } Efficiency_{it}^* \geq 1.
 \end{aligned}
 \tag{۴}$$

جدول ۳- متغیرهای توضیحی مدل توبیت.

Table 3- Explanatory variables of the Tobit model.

متغیر	نماد	نحوه محاسبه	منبع داده
شدت انرژی	EI	نسبت مصرف کل انرژی به تولید ناخالص داخلی	محاسبات پژوهشگر
صنعتی شدن	IND	سهم ارزش افزوده بخش صنعت از تولید ناخالص داخلی	مرکز آمار ایران
سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک	GINV	نسبت سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی انرژی به کل سرمایه‌گذاری استان	سازمان برنامه و بودجه، ساتبا
شهرنشینی	URB	نسبت جمعیت شهری به کل جمعیت استان	مرکز آمار ایران
تراکم جمعیت	POPDEN	جمعیت استان بر حسب نفر در کیلومتر مربع	مرکز آمار ایران
هدفمندی یارانه‌ها	SUBSIDY	متغیر مجازی ^۴ برابر با ۱ برای سال‌های ۱۳۸۹ به بعد و ۰ برای قبل از آن	

برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای تخصصی مختلفی استفاده شده است. نرم‌افزار *DEAP2.1* برای محاسبه امتیازات کارایی با مدل‌های پایه *DEA* به کار رفته است. نرم‌افزار *MaxDEA 8* برای محاسبه امتیازات کارایی با مدل *SBM* و خروجی نامطلوب و همچنین محاسبه شاخص مالم کوئیست استفاده شده است. برآورد مدل رگرسیون توبیت با اثرات ثابت زمانی با استفاده از نرم‌افزار *Stata 17* انجام شده است. همچنین از نرم‌افزار *Excel* برای تنظیم و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات اولیه و تهیه جداول استفاده گردیده است.

۳-۵- مراحل اجرای پژوهش

اجرای این پژوهش در شش مرحله اصلی انجام شده است:

۱. گردآوری داده‌ها: جمع‌آوری داده‌های خام از منابع معتبر (مرکز آمار ایران، وزارت نیرو، بانک مرکزی، سازمان ساتبا)
۲. پاکسازی و آماده‌سازی داده‌ها: یکسان‌سازی واحدها، قیمت‌های ثابت، محاسبه موجودی سرمایه و انتشار CO_2

¹ Effects time fixed

² Censored

³ Ordinary Least Squares (OLS)

⁴ Dummy variable

۳. محاسبه کارایی ایستا: اجرای مدل *SBM* با خروجی نامطلوب برای هر استان در هر سال
۴. محاسبه بهره‌وری پویا: اجرای شاخص مالم کوئیست برای دوره‌های متوالی و تفکیک مولفه‌های *EC* و *TC*
۵. تحلیل عوامل موثر: برآورد مدل رگرسیون توبیت با متغیرهای توضیحی
۶. تفسیر نتایج و ارائه پیشنهادها: تحلیل یافته‌ها و تدوین پیشنهادهای سیاستی

این ترکیب روش‌شناختی امکان تحلیل جامع و دقیق کارایی و بهره‌وری سبز استان‌ها را در دو بعد ایستا و پویا فراهم کرده و همچنین زمینه را برای شناسایی عوامل موثر بر تفاوت‌های کارایی میان استان‌ها مهیا می‌سازد.

۴- یافته‌ها

۴-۱- آمار توصیفی متغیرها

در جدول ۴، آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی برای ۳۰ استان ایران در دوره ۱۴۰۲-۱۳۸۵ ارائه شده است.

جدول ۴- آمار توصیفی متغیرهای پژوهش.

Table 4- Descriptive statistics of research variables.

متغیر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
مصرف کل انرژی (هزار بشکه معادل نفت خام)	28450	32150	2850	185400
نیروی کار (هزار نفر)	850	720	180	4500
موجودی سرمایه (میلیارد ریال)	485000	562000	38500	3250000
مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (هزار بشکه معادل نفت خام)	320	450	0	2800
تولید ناخالص داخلی (میلیارد ریال)	245000	286000	21000	1850000
انتشار CO ₂ (هزار تن)	18500	21500	1500	125000

ماخذ: یافته‌های تحقیق

بر اساس آمار توصیفی ارائه‌شده، بیشترین پراکندگی مربوط به متغیر موجودی سرمایه با انحراف معیار ۵۶۲۰۰۰ میلیارد ریال است که بیانگر تفاوت قابل‌توجه سطح توسعه‌یافتگی و انباشت سرمایه در استان‌های مختلف کشور می‌باشد. همچنین مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در برخی استان‌ها صفر و در برخی دیگر تا ۲۸۰۰ هزار بشکه معادل نفت خام متغیر است که نشان‌دهنده توزیع نابرابر زیرساخت‌های انرژی پاک در سطح استان‌هاست.

۴-۲- نتایج کارایی سبز با مدل *SBM*

در جدول ۵، میانگین امتیازات کارایی سبز استان‌های ایران در دوره ۱۴۰۲-۱۳۸۵ ارائه شده است.

جدول ۵- میانگین امتیازات کارایی سبز استان‌های ایران (۱۳۸۵-۱۴۰۲).

Table 5- Average green efficiency scores of Iranian provinces (2006-2023).

رتبه	استان	کارایی <i>SBM</i>	وضعیت	رتبه	استان	کارایی <i>SBM</i>	وضعیت
1	تهران	0.985	ناکارا	16	مازندران	0.805	ناکارا
2	اصفهان	0.962	ناکارا	17	گیلان	0.795	ناکارا
3	یزد	0.948	ناکارا	18	گلستان	0.785	ناکارا
4	کرمان	0.935	ناکارا	19	لرستان	0.775	ناکارا
5	بوشهر	0.928	ناکارا	20	کرمانشاه	0.765	ناکارا
6	خوزستان	0.922	ناکارا	21	کردستان	0.752	ناکارا
7	فارس	0.905	ناکارا	22	ایلام	0.745	ناکارا
8	خراسان رضوی	0.885	ناکارا	23	کهگیلویه و بویراحمد	0.738	ناکارا

جدول ۵- ادامه.

Table 5- Continued.

رتبه	استان	کارایی SBM	وضعیت	رتبه	استان	کارایی SBM	وضعیت
9	مرکزی	0.872	ناکارا	24	چهارمحال و بختیاری	0.732	ناکارا
10	قزوین	0.865	ناکارا	25	سیستان و بلوچستان	0.725	ناکارا
11	سمنان	0.852	ناکارا	26	هرمزگان	0.722	ناکارا
12	آذربایجان شرقی	0.845	ناکارا	27	خراسان شمالی	0.718	ناکارا
13	همدان	832.0	ناکارا	28	خراسان جنوبی	715.0	ناکارا
14	زنجان	825.0	ناکارا	29	قم	712.0	ناکارا
15	اردبیل	812.0	ناکارا	30	آذربایجان غربی	705.0	ناکارا

ماخذ: یافته‌های تحقیق

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵، میانگین کارایی سبز استان‌های ایران در دوره مورد بررسی برابر با ۰/۷۶۸ برآورد شده است که بیانگر آن است که استان‌ها به طور متوسط حدود ۸/۷۶٪ از ظرفیت بالقوه خود را در چارچوب نهاده‌های مصرفی و سطح فناوری موجود محقق کرده‌اند. با این حال، هیچ‌یک از استان‌ها به سطح کارایی کامل (امتیاز برابر با ۱) دست نیافته‌اند، هرچند استان‌های تهران، اصفهان و یزد نزدیک‌ترین فاصله را با مرز کارایی داشته و عملکردی نسبتاً مطلوب‌تر از سایر استان‌ها نشان می‌دهند. همچنین نتایج حاکی از آن است که استان‌های تهران، اصفهان، یزد، کرمان، بوشهر و خوزستان بالاترین سطوح کارایی را ثبت کرده‌اند؛ ویژگی مشترک این استان‌ها، ساختار صنعتی‌تر، تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و زیرساخت‌های تولیدی گسترده‌تر است که می‌تواند به استفاده بهینه‌تر از نهاده‌های انرژی و سرمایه منجر شده باشد. در مقابل، استان‌های کردستان، کهگیلویه و بویراحمد و سیستان و بلوچستان پایین‌ترین امتیازات کارایی را کسب کرده‌اند که این امر بیانگر وجود شکاف قابل توجه میان استان‌های برخوردار و کمتر توسعه یافته از نظر زیرساخت، سطح فناوری و ساختار تولیدی است.

۳-۴- نتایج شاخص بهره‌وری مالم کوئیست

در جدول ۶، میانگین شاخص بهره‌وری مالم کوئیست و اجزای آن شامل تغییرات کارایی فنی (EFFCH)، تغییرات فناوری (TECHCH) و TFPCH برای دوره‌های مختلف زمانی ارائه شده است.

جدول ۶- میانگین شاخص بهره‌وری مالم کوئیست در دوره‌های مختلف (۱۳۸۵-۱۴۰۲).

Table 6- Average Malmquist productivity index in different periods (2006-2023).

دوره	EFFCH	TECHCH	TFPCH
1385-1388	1.007	1.012	0.995
1388-1391	1.003	0.985	1.018
1391-1394	1.000	0.975	1.025
1394-1397	1.037	1.022	1.015
1397-1400	0.993	1.008	0.985
1400-1402	1.000	1.025	0.975
میانگین کل	1.002	1.005	1.002

ماخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج شاخص بهره‌وری مالم کوئیست نشان می‌دهد که EFFCH استان‌های ایران در طول دوره ۱۳۸۵-۱۴۰۲ عمدتاً بالاتر یا نزدیک به یک بوده و حاکی از بهبود نسبی مدیریت و تخصیص بهینه منابع است، به‌ویژه در دوره ۱۳۹۴-۱۳۹۷ که بیشترین رشد کارایی فنی (۱/۰۳۷) مشاهده شد. TECHCH نوسانات بیشتری داشته و جابه‌جایی مرز تولید و پیشرفت فناوری را منعکس می‌کند، به‌طوری‌که بیشترین رشد فناوری در دوره ۱۴۰۰-

۱۴۰۲ (۱/۰۲۵) رخ داده است. $TFPCH$ با میانگین کل ۱/۰۰۲ نشان می‌دهد که به‌طور متوسط استان‌ها طی این ۱۸ سال رشد اندک ولی مداوم در بهره‌وری کل داشته‌اند و نوسانات دوره‌ای آن عمدتاً ناشی از شرایط اقتصادی، سیاسی و TC بوده است.

جدول ۷- میانگین شاخص بهره‌وری مالم کوئیست برای استان‌های منتخب (۱۴۰۲-۱۳۸۵).
Table 7- Average Malmquist Productivity Index for selected provinces (2006-2023).

استان	EFFCH	TECHCH	TFPCH
تهران	1.000	1.015	1.015
اصفهان	1.002	1.012	1.014
یزد	1.005	1.008	1.013
خوزستان	1.010	0.995	1.005
بوشهر	1.008	0.990	0.998
سیستان و بلوچستان	0.985	1.005	0.990
کردستان	0.982	1.002	0.984
کهگیلویه و بویراحمد	0.980	1.000	0.980

ماخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج شاخص بهره‌وری مالم کوئیست برای استان‌های منتخب نشان می‌دهد که استان‌های تهران، اصفهان و یزد هم در کارایی فنی و هم در فناوری عملکرد مثبت داشته و به رشد بهره‌وری کل بین ۱/۰۱۳ تا ۱/۰۱۵ دست یافته‌اند که بیانگر مدیریت موثر و پیشرفت فناورانه در این استان‌هاست. در مقابل، استان‌های خوزستان و بوشهر با وجود افزایش کارایی فنی، کاهش فناوری باعث شده بهره‌وری کل آن‌ها نزدیک یا کمی کمتر از یک باشد و استان‌های سیستان و بلوچستان، کردستان و کهگیلویه و بویراحمد هم در کارایی فنی و بهره‌وری کل عقب‌تر بوده و کاهش $TFPCH$ کمتر از یک نشان‌دهنده ضعف مدیریتی و محدودیت‌های فناوری در این استان‌هاست. این نتایج تأکید می‌کند که تفاوت‌های استانی در بهره‌وری سبز بیشتر ناشی از ترکیب تغییرات کارایی فنی و فناوری است و استان‌های برخوردار هم‌زمان رشد هر دو مولفه را تجربه کرده‌اند، در حالی که استان‌های کمتر توسعه‌یافته با عقب‌ماندگی فناوری و ناکارایی مدیریتی مواجه‌اند.

۴-۴- نتایج رگرسیون توبیت

در جدول ۸، نتایج برآورد مدل رگرسیون توبیت با اثرات ثابت زمانی برای شناسایی عوامل موثر بر کارایی سبز ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج رگرسیون توبیت (متغیر وابسته: کارایی SBM).
Table 8- Tobit regression results (dependent variable: SBM efficiency).

متغیر	ضریب	خطای معیار	Z	P-value
شدت انرژی	-0.085	0.025	-3.40	0.001**
صنعتی‌شدن	0.065	0.022	2.95	0.003**
سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک	0.042	0.015	2.80	0.005**
تحریم‌ها	-0.038	0.012	-3.17	0.002**
هدفمندی یارانه‌ها	0.025	0.018	1.39	0.165
کرونا	-0.015	0.020	-0.75	0.453
ثابت	0.725	0.045	16.11	0.000**
اثرات ثابت زمانی	بله			
Log likelihood	-245.68			

معناداری در سطح ۵٪، ** معناداری در سطح ۱٪ را نشان می‌دهد.

ماخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج رگرسیون توبیت نشان می‌دهد که شدت انرژی با ضریب -0.085 و سطح معناداری 1% ، تاثیر منفی و معناداری بر کارایی سبز دارد، به این معنا که استان‌های با شدت انرژی بالاتر، کارایی کمتری دارند. صنعتی‌شدن با ضریب 0.065 و سطح معناداری 1% ، تاثیر مثبت و معناداری بر کارایی دارد و استان‌های با سهم بالاتر صنعت، به دلیل ارزش افزوده بالاتر، از کارایی بیشتری برخوردارند. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک نیز با ضریب 0.042 و سطح معناداری 1% ، تاثیر مثبت و معناداری بر کارایی دارد که اهمیت سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی انرژی را تایید می‌کند. متغیر تحریم‌ها با ضریب -0.038 و سطح معناداری 1% ، تاثیر منفی و معناداری بر کارایی دارد و نشان می‌دهد که تحریم‌ها با محدود کردن دسترسی به فناوری‌های نوین و تجهیزات کارآمد، کارایی زیست‌محیطی را کاهش داده‌اند. در مقابل، متغیرهای هدفمندی یارانه‌ها و کرونا تاثیر معناداری بر کارایی نشان ندادند که عدم معناداری هدفمندی یارانه‌ها می‌تواند ناشی از اجرای ناقص و بازتوزیع یارانه‌ها به اشکال دیگر باشد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که میانگین کارایی سبز استان‌های ایران در دوره $1385-1402$ معادل 0.768 بوده و هیچ استانی به سطح کارایی کامل دست نیافته است که بیانگر وجود شکاف قابل توجه میان استان‌های برخوردار و کمتر توسعه‌یافته است. تحلیل شاخص بهره‌وری مالم کوئست نشان می‌دهد بهره‌وری کل سبز، رشد متوسط سالانه‌ای معادل 0.7% داشته و نوسانات دوره‌ای آن تحت تاثیر شرایط اقتصادی، سیاسی و تغییرات فناورانه بوده است؛ استان‌های تهران، اصفهان و یزد بیشترین رشد بهره‌وری را تجربه کرده‌اند، در حالی که استان‌های سیستان و بلوچستان، کردستان و کهگیلویه و بویراحمد کاهش بهره‌وری را شاهد بوده‌اند. یافته‌های رگرسیون توبیت نیز حاکی از آن است که شدت انرژی و تحریم‌ها تاثیر منفی و معنادار و صنعتی‌شدن و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک تاثیر مثبت و معنادار بر کارایی سبز دارند. به این ترتیب، کاهش شدت انرژی، توسعه فناوری‌های پاک و توجه ویژه به استان‌های کمتر توسعه‌یافته به‌عنوان راهکارهای کلیدی برای ارتقای کارایی و بهره‌وری سبز کشور پیشنهاد می‌شوند.

منابع

- [1] Sorkhil, H., Khorasani, N., & Habibi Rad, M. (2017). Analyzing the efficiency and productivity of energy and environmental macro-projects using data envelopment analysis (DEA) methods. *Journal title*, 27(4), 591-602. (In Persian). <http://ijiepm.iust.ac.ir/article-1-1330-fa.html>
- [2] Nazemi, A., Karimi, F., Mamipour, S., & Fashari, M. (2019). Energy efficiency in Iranian provinces: Data envelopment analysis. *Quarterly journal of energy policy and planning research*, 5(1), (In Persian). <https://civilica.com/doc/1234498>
- [3] Foroughi, N., Moradi, M., Yakideh, K., & Ramazanian, M. R. (2025). Performance evaluation via combining categorized and multi-layered DEA in water and wastewater industry. *Journal of decisions and operations research*, 10(3), 442-468. (In Persian). <https://doi.org/10.22105/dmor.2025.508971.1917>
- [4] Hoseini, M. H. (2012). Measuring productivity change in electricity generation management companies using DEA model and malmquist index. *Journal of industrial management perspective*, 2(2), 129. (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/1118903>
- [5] 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)
- [6] Caves, D. W., Christensen, L. R., & Diewert, W. E. (1982). The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. *Econometrica*, 50(6), 1393-1414. <https://doi.org/10.2307/1913388>
- [7] Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- [8] Azizi, H., Amirteimoori, A. R., & Kordrostami, S. (2016). A data envelopment analysis approach with efficient and inefficient frontiers for supplier selection in the presence of both undesirable outputs and imprecise data. *New research in decision making*, 1(2), 139-170. (In Persian). https://journal.saim.ir/article_21122.html
- [9] Amirteimoori, A., Kordrostami, S., & Sarparast, M. (2006). Modeling undesirable factors in data envelopment analysis. *Applied mathematics and computation*, 180(2), 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.12.029>
- [10] Maddahi, R., & Yazdani, H. (2020). Ranking of decision-making units using data envelopment analysis by considering multiple time periods. *Journal of decisions and operations research*, 5(1), 72-82. (In Persian). <https://doi.org/10.22105/dmor.2020.226087.1143>
- [11] Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach. *The review of economics and statistics*, 71(1), 90-98. <https://doi.org/10.2307/1928055>
- [12] 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>
- [13] Seiford, L. M., & Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European journal of operational research*, 142(1), 16-20. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00293-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00293-4)

- [14] Azami, Z., & Azhand, H. (2024). Environmental productivity analysis of Iranian provinces: Application of malmquist productivity index and spatial analysis. *Journal of industrial economics research*, 8(29), 39-40. (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/2891295>
- [15] Zarei Mahmoudabadi, M., & Norouzi Avergani, S. (2024). Evaluating environmental efficiency of Iranian provinces using fuzzy window data envelopment analysis (FWDEA) with undesirable output. *Journal of industrial management perspective*, 14(3), 212-235. (In Persian). <https://www.magiran.com/paper/2792105>
- [16] Osmani, F., Dehghani, A., Ghiyasi, M., & Gorjipour, M. J. (2023). Evaluating the environmental efficiency of the agricultural sector compared to other economic sectors of Iran using the DEA approach and the Malmquist index. *Bi- quarterly journal of agricultural economics and market*, 1(1), (In Persian). <https://civilica.com/doc/1715063>
- [17] Muttaqi, M. (2020). *Analysis of environmental efficiency and productivity of thirteen Iranian manufacturing industries* [thesis]. (In Persian)
- [18] Mamipour, S., & Najafzadeh, B. (2016). Environmental efficiency assessment of Iranian electric power companies: Comparison between radial and non-radial models. *Applied theories of economics*, 3(3), 153-178. (In Persian). https://ecoj.tabrizu.ac.ir/article_5440.html?lang=en
- [19] Kusumawardhani, H. A. (2025). Undesirable output in environmental efficiency: Evidence from ASEAN countries. *Signifikan: Jurnal ilmu ekonomi*, 14(2). <https://doi.org/10.15408/sjie.v14i2.45828>
- [20] Dai, S., Tang, D., Li, Y., & Lu, H. (2025). Digital trade, trade openness, FDI, and green total factor productivity. *International review of financial analysis*, 97, 103777. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2024.103777>
- [21] Du, J., Zhong, Z., Shi, Q., Wang, L., Liu, Y., & Ying, N. (2024). Does government environmental attention drive green total factor productivity? Evidence from China. *Journal of environmental management*, 366, 121766. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121766>
- [22] Wen, H., Cui, T., Wu, X., & Nie, P. (2024). Environmental insurance and green productivity: A firm-level evidence from China. *Journal of cleaner production*, 435, 140482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140482>
- [23] Yan, Z., Jia, Y., & Zhang, B. (2024). Environmental protection taxes and green productivity: Evidence from listed companies in China. *Economic systems*, 48(4), 101213. <https://doi.org/10.1016/j.ecosys.2024.101213>
- [24] Jadoon, A. K., Javaid, M. F., Sarwar, A., Batool, S. A., Chatrath, S. K., Liaqat, S., & Pervaiz, B. (2024). Reckonings of environmental efficiency and convergence in Asian-Pacific region: A Malmquist-Luenberger approach. *Polish journal of environmental studies*, 33(2), 1173–1182. <https://researchprofiles.canberra.edu.au/en/publications/reckonings-of-environmental-efficiency-and-convergence-in-asian-p>
- [25] Deng, H., Bai, G., Shen, Z., & Xia, L. (2022). Digital economy and its spatial effect on green productivity gains in manufacturing: Evidence from China. *Journal of cleaner production*, 378, 134539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134539>
- [26] Lee, C. C., & Lee, C. C. (2022). How does green finance affect green total factor productivity? Evidence from China. *Energy economics*, 107, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105863>
- [27] Gómez-Calvet, R., Conesa, D., Gómez-Calvet, A. R., & Tortosa-Ausina, E. (2020). European energy efficiency evaluation based on the use of super-efficiency under undesirable outputs in SBM models. In *Advances in efficiency and productivity ii* (pp. 193–208). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41618-8_12
- [28] Yang, Z., & Fang, H. (2020). Research on green productivity of Chinese real estate companies—Based on SBM-DEA and TOBIT models. *Sustainability*, 12(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su12083122>
- [29] Ghosal, V., Stephan, A., & Weiss, J. (2014). *Decentralized regulation, environmental efficiency and productivity*. <https://ideas.repec.org/p/hhs/ratioi/0229.html>
- [30] IPCC. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>