Industrial Economics Researches Open Access

Autumn & Winter (2025) 9 (33): 57-74

DOI: .10.30473/jier.2026.76602.1527.

ORIGINAL ARTICLE

# Assessment of Green Productivity and Efficiency Changes in Iranian Industries Using a Slacks-Based Data Envelopment Analysis Approach and the Malmquist Index

Marzieh Radsar, [1], Khosro Azizi [2*], Mehdi Fathabadi [3], Amir Gholamabri [4]

1.Ph.D. Student in Islamic Economics, Department of Economics, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran. ORCID: 0009-0002-9365-7142

2. Assistant Professor, Faculty of Management, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran ORCID: 0000-0002-0618-7449

3. Department of Economics, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran. ORCID: 0000-0001-5478-9148

4. Associate Professor, Department of Mathematics, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, Firoozkooh, Iran. ORCID: 0000-0003-1981-9756

Correspondence: Khosro Azizi
Email: Kh.Azizi@iau.ac.ir

Received: 24 Nov 2025
Revised : 8 Jan 2026
Accepted: 14 Apl 2026

**How to cite:**
Radsar, M., Azizi, Kh. Fathabadi. M., Gholamabri, A. (2026). Assessment of Green Productivity and Efficiency Changes in Iranian Industries Using a Slacks-Based Data Envelopment Analysis Approach and the Malmquist Index. *Industrial Economics Researches*, 9 (33): 57-74
DOI: .10.30473/jier.2026.76602.1527.

**ABSTRACT**

This study was conducted to assess changes in green productivity and efficiency in Iranian industries during the period 1394–1398 (2015–2019). A slack-based output-oriented Data Envelopment Analysis (DEA) model under variable returns to scale was employed. Inputs included number of employees, value of raw materials, gross fixed capital formation, and total energy consumption; the desirable output was industrial value added; and undesirable outputs were waste and wastewater. Results indicated an average green efficiency of 0،683 (95% confidence interval: [0،652, 0،714]), with energy slack (41،8%) and waste slack (33،1%) being the primary sources of inefficiency. The Malmquist index averaged 0،958, reflecting a 4،2% annual decline in green productivity; 64،3% of this decline stemmed from technological regress (TC=0،973) and 35،7% from efficiency change (EC=0،985). The food and textile industries exhibited the best performance, while basic metals and coke and petroleum refining industries showed the worst. Based on the findings, it is recommended that policymakers prioritize reducing energy and waste slacks through financial incentives and mandatory audits, and address technological regress via green technology transfer to high-consuming industries, thereby enhancing green efficiency and productivity.

**KEYWORDS**

Green efficiency; Data envelopment analysis; Slacks-based measure; Malmquist index; Iranian industries.

**JEL** : L60؛ Q56؛ C61

Copyright © 2025 The Authors. Published by Payame Noor University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

# پژوهش‌های اقتصاد صنعتی

سال نهم، شماره سی و سوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، (۷۴-۵۷)

DOI: 10.30473/jier.2026.76602.1527


**«مقاله پژوهشی»**

# ارزیابی تغییرات بهره‌وری و کارایی سبز صنایع ایران با رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها مبتنی بر اندازه‌گیری اسلک و شاخص مالکوم کوئیست


**مرضیه رادسر[۱]، خسرو عزیزی[۲*]، مهدی فتح آبادی[۳]، امیر غلام ابری[۴]**

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد اسلامی، گروه اقتصاد، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران. ORCID: 0009-0002-9365-7142

۲. استادیار، دانشکده مدیریت، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. ORCID: 0000-0002-0618-7449

۳. گروه اقتصاد، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران. (نکته: مرتبه علمی ایشان مثلاً استادیار/دانشیار در اطلاعات شما ذکر نشده بود، در صورت نیاز اضافه کنید). ORCID: 0000-0001-5478-9148

۴. دانشیار، گروه ریاضی، واحد فیروزکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزکوه، ایران. ORCID: 0000-0003-1981-9756

نویسنده مسئول: خسرو عزیزی

رایانامه Kh.Azizi@iau.ac.ir



تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

تاریخ بازنگری : ۱۴۰۴/۱۰/۱۸

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۵/۰۱/۲۵

**استناد به این مقاله:**

رادسر، مرضیه ، عزیزی، خسرو و فتح آبادی، مهدی، غلام ابری، امیر (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات بهره‌وری و کارایی سبز صنایع ایران با رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها مبتنی بر اندازه‌گیری اسلک و شاخص مالکوم کوئیست. *پژوهش‌های اقتصاد صنعتی*، دو فصلنامه پژوهش های اقتصاد صنعتی ۹، ۵۷-۷۴، (۳۳) (DOI: 10.30473/jier.2026.76602.1527)



## چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی تغییرات بهره‌وری و کارایی سبز صنایع ایران در دوره ۱۳۹۴–۱۳۹۸ انجام شد. از مدل تحلیل پوششی داده‌ها با رویکرد خروجی‌محور و فرض بازده متغیر به مقیاس مبتنی بر اندازه‌گیری اسلک استفاده شد. ورودی‌ها شامل تعداد کارکنان، ارزش مواد اولیه، تشکیل سرمایه ثابت و مصرف انرژی کل؛ خروجی مطلوب شامل ارزش افزوده صنعتی؛ و خروجی‌های نامطلوب شامل پسماند و فاضلاب بود. نتایج نشان داد میانگین کارایی سبز ۰،۶۸۳ (حدود اطمینان ۹۵٪: [۰،۶۵۲، ۰،۷۱۴]) بوده و اسلک انرژی (۴۱،۸٪) و پسماند (۳۳،۱٪) عوامل اصلی ناکارایی هستند. شاخص مالمکوئیست میانگین ۰،۹۵۸ را نشان داد که بیانگر کاهش سالانه ۴،۲ درصدی بهره‌وری سبز است؛ ۶۴،۳٪ از این کاهش ناشی از عقب‌ماندگی فنی (TC=۰،۹۷۳) و ۳۵،۷٪ از تغییر کارایی (EC=۰،۹۸۵) است. صنایع غذایی و نساجی بهترین و صنایع فلزات اساسی و کک و پالایش نفت بدترین عملکرد را داشتند. بر اساس نتایج، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران با اولویت کاهش اسلک انرژی و پسماند از طریق مشوق‌های مالی و ممیزی اجباری، و مقابله با عقب‌ماندگی فنی از طریق انتقال فناوری سبز به صنایع پرمصرف، کارایی و بهره‌وری سبز را ارتقا دهند.



## واژه‌های کلیدی

کارایی سبز، تحلیل پوششی داده‌ها، اندازه‌گیری اسلک، شاخص مالکوم کوئیست، صنایع ایران.

JEL: L60 ؛Q56 ؛C61



حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۴ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع فعالیت‌های صنعتی در سراسر جهان، به‌ویژه در اقتصادهای در حال توسعه، با مصرف بی‌رویه منابع طبیعی، افزایش شدید آلودگی‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه بوده و نگرانی‌های گسترده‌ای در مورد پایداری توسعه اقتصادی ایجاد کرده است. این رشد، هرچند به افزایش تولید و ارزش افزوده اقتصادی منجر شده، اما هزینه‌های سنگین زیست‌محیطی به همراه داشته و ضرورت بازنگری در الگوهای تولید را برجسته ساخته است. در این میان، مفهوم «کارایی سبز»[1] به‌عنوان شاخصی کلیدی برای سنجش عملکرد واحدهای تولیدی مطرح شده که توانایی بنگاه‌ها را در دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی (حداکثر کردن خروجی‌های مطلوب مانند ارزش افزوده) و زیست‌محیطی (حداقل کردن خروجی‌های نامطلوب مانند پسماند، فاضلاب و آلاینده‌ها) ارزیابی می‌کند (لی و همکاران[2] ۲۰۲۲؛ سویوشی و گوتو[3] ۲۰۱۹). کارایی سبز، برخلاف رویکردهای سنتی که تنها بر جنبه‌های اقتصادی تمرکز داشتند، آثار منفی زیست‌محیطی را به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فرآیند تولید لحاظ می‌کند و بیانگر استفاده بهینه از نهاده‌ها (مانند نیروی کار، سرمایه، مواد اولیه و انرژی) برای تولید حداکثر خروجی مطلوب با حداقل آسیب به محیط زیست است. از آنجا که بخش صنعت سهم چشمگیری در مصرف انرژی جهانی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تولید ضایعات دارد، ارزیابی و ارتقای کارایی سبز در این بخش یکی از محورهای اصلی سیاست‌های توسعه پایدار در سطح ملی و بین‌المللی محسوب می‌شود (ژو و همکاران[4] ۲۰۲۳).

در ادبیات اقتصادی و زیست‌محیطی، روش تحلیل پوششی داده‌ها[5] به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای ناپارامتریک برای سنجش کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده[6] شناخته می‌شود که بدون نیاز به فرض تابع تولید مشخص، عملکرد واحدهای مشابه را مقایسه می‌کند (چارنز و همکاران[7] ۱۹۷۸). این روش با محاسبه مرز کارایی، ناکارایی‌ها را شناسایی کرده و پیشنهادهایی برای بهبود ارائه می‌دهد. با این حال، مدل‌های کلاسیک DEA در برخورد با خروجی‌های نامطلوب (مانند آلاینده‌ها) محدودیت داشتند، زیرا این خروجی‌ها را یا نادیده می‌گرفتند یا به‌صورت معکوس لحاظ می‌کردند که دقت تحلیل را کاهش می‌داد. برای رفع این محدودیت، مدل مبتنی بر اندازه‌گیری اسلک[8] توسط تون[9] (۲۰۰۱) توسعه یافت که امکان سنجش هم‌زمان ناکارایی‌های مرتبط با ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را در چارچوبی واحد و دقیق‌تر فراهم می‌آورد. این مدل با تمرکز مستقیم بر اسلک‌ها (فاصله تا مرز کارایی)، پایه‌ای محکم برای ارزیابی «کارایی سبز» ایجاد کرد که در آن اهداف زیست‌محیطی هم‌وزن اهداف اقتصادی قرار می‌گیرند (ژو و همکاران[10] ۲۰۱۸). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که مدل SBM در مقایسه با رویکردهای سنتی، تفاوت‌های عملکردی صنایع را در سطوح بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی با دقت بیشتری آشکار می‌سازد و منابع اصلی ناکارایی (مانند اسلک انرژی یا پسماند) را به‌صورت کمی شناسایی می‌کند (لیو و وانگ[11] ۲۰۲۱؛ ژانگ و همکاران[12] ۲۰۲۰).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در تحلیل ایستای کارایی سبز، چالش اصلی همچنان در سنجش پویایی زمانی بهره‌وری کل عوامل[13] نهفته است، زیرا عملکرد واحدهای تولیدی در طول زمان تحت تأثیر تغییرات فنی و مدیریتی قرار دارد. در این راستا، شاخص مالمکوئیست[14] ابزاری مؤثر برای ارزیابی تغییرات بهره‌وری در دوره‌های متوالی فراهم می‌سازد (کیوز و همکاران[15] ۱۹۸۲). این شاخص، تغییرات بهره‌وری را به دو جزء اصلی تفکیک می‌کند: تغییر کارایی فنی[16] که نشان‌دهنده نزدیک شدن یا دور شدن واحد از مرز کارایی در طول زمان است، و تغییر فناوری[17] که بیانگر جابه‌جایی مرز کارایی به دلیل پیشرفت یا پس‌رفت فنی است (فاره و همکاران[18] ۱۹۹۴). ترکیب شاخص مالمکوئیست با مدل‌های DEA، به‌ویژه SBM، امکان تحلیل جامع‌تری از پویایی بهره‌وری سبز را فراهم می‌آورد و نشان می‌دهد که آیا تغییرات مشاهده‌شده

---

[1] Green Efficiency
[2] Li et al.
[3] Sueyoshi & Goto
[4] Zhou et al.
[5] Data Envelopment Analysis (DEA)
[6] Decision Making Units (DMUs)
[7] Charnes et al.
[8] Slack-Based Measure (SBM)
[9] Tone
[10] Zhou et al.
[11] Liu & Wang
[12] Zhang et al.
[13] Total Factor Productivity (TFP)
[14] Malmquist Productivity Index
[15] Caves et al.
[16] Efficiency Change (EC)
[17] Technological Change (TC)
[18] Färe et al.

ناشی از بهبود مدیریت منابع و کاهش ناکارایی‌ها بوده یا از ارتقای فناوری سرچشمه گرفته است (چن و گولی[1] ۲۰۲۱). این رویکرد ترکیبی در مطالعات اخیر برای بررسی روندهای بلندمدت عملکرد زیست‌محیطی صنایع به کار رفته و اطلاعات ارزشمندی برای سیاست‌گذاری ارائه کرده است (گو و همکاران[2] ۲۰۱۸؛ لیو و همکاران[3] ۲۰۲۲).

در ایران، بخش صنعت به‌عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد، نقش محوری در رشد اقتصادی ایفا می‌کند، اما همزمان سهم بالایی در مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها و تولید ضایعات دارد. مطالعات متعددی در حوزه کارایی انرژی و عملکرد زیست‌محیطی صنایع ایران انجام شده، اما اکثر آن‌ها به تحلیل‌های ایستا محدود مانده و تغییرات پویای بهره‌وری سبز را کمتر بررسی کرده‌اند. با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی کشور، از جمله محدودیت منابع آب، آلودگی هوا و وابستگی به سوخت‌های فسیلی، تحلیل روند تغییرات بهره‌وری سبز در صنایع می‌تواند اطلاعات کلیدی برای سیاست‌گذاری صنعتی و زیست‌محیطی فراهم سازد.

ضرورت انجام پژوهش حاضر از چندین جنبه برجسته است. نخست، از منظر سیاست‌گذاری، دستیابی به اهداف توسعه پایدار بدون شناخت دقیق سطح کارایی سبز صنایع و روند تغییرات آن در طول زمان امکان‌پذیر نیست. دوم، در شرایط اقتصاد ایران که با محدودیت‌های مالی، نوسانات قیمتی انرژی و تحریم‌های بین‌المللی روبرو است، بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش آثار زیست‌محیطی می‌تواند رقابت‌پذیری صنایع را افزایش دهد. سوم، از دیدگاه نظری، کاربرد ترکیبی مدل SBM و شاخص مالمکوئیست زمینه‌ای برای توسعه چارچوب‌های جامع ارزیابی پویای بهره‌وری سبز فراهم می‌کند که در ادبیات داخلی کمتر به آن پرداخته شده است.

شکاف دانشی موجود در ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات داخلی اغلب به کارایی انرژی یا مدل‌های DEA بدون تفکیک دقیق خروجی‌های نامطلوب محدود مانده‌اند، و تحلیل پویای بهره‌وری سبز در چارچوب SBM-Malmquist تاکنون انجام نشده است. همچنین، پژوهش‌های بین‌المللی عمدتاً بر اقتصادهای توسعه‌یافته یا بزرگ متمرکز بوده و شرایط خاص اقتصادهای در حال گذار مانند ایران را کمتر در نظر گرفته‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

نوآوری مطالعه حاضر در به‌کارگیری داده‌های واقعی صنایع ایران برای تحلیل ترکیبی کارایی سبز ایستا (با مدل SBM) و پویا (با شاخص مالمکوئیست) است. اهداف اصلی شامل ارزیابی سطح کارایی سبز، شناسایی منابع اصلی ناکارایی، تجزیه تغییرات بهره‌وری به اجزای فنی و کارایی، و مقایسه عملکرد زیربخش‌های صنعتی است. سؤالات پژوهش عبارتند از: ۱) آیا کارایی سبز صنایع ایران در دوره ۱۳۹۴–۱۳۹۸ بهبود یافته یا کاهش یافته است؟ ۲) چه عواملی (تغییر کارایی فنی یا تغییر فناوری) بیشترین تأثیر را بر تغییرات بهره‌وری سبز داشته‌اند؟ ۳) کدام زیربخش‌های صنعتی بهترین یا بدترین پویایی را نشان داده‌اند؟

مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: بخش دوم به مرور جامع ادبیات می‌پردازد؛ بخش سوم روش‌شناسی، مدل‌ها و داده‌ها را توصیف می‌کند؛ بخش چهارم نتایج تجربی را ارائه و تحلیل می‌نماید؛ و بخش پنجم با بحث سیاست‌گذاری، پیشنهادها و نتیجه‌گیری پایان می‌یابد. چارچوب مفهومی پژوهش بر ترکیب مدل SBM برای سنجش دقیق اسلک‌ها و شاخص مالمکوئیست برای تحلیل تغییرات زمانی استوار است و عملکرد اقتصادی–زیست‌محیطی صنایع را در ابعاد ایستا و پویا بررسی می‌کند.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه

مبانی نظری پژوهش حاضر بر پایه مفهوم کارایی سبز[4]استوار است که از نظریه‌های اقتصاد زیست‌محیطی و توسعه پایدار نشأت گرفته و بر ارزیابی عملکرد واحدهای تولیدی با تأکید هم‌زمان بر اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تمرکز دارد. کارایی سبز به معنای توانایی تولید حداکثر خروجی مطلوب (مانند ارزش افزوده صنعتی) با استفاده بهینه از نهاده‌ها (نیروی کار، سرمایه، مواد اولیه و انرژی)، در حالی که خروجی‌های نامطلوب (مانند پسماند، فاضلاب و آلاینده‌ها) به حداقل برسد، تعریف می‌شود (لی و همکاران[5] ۲۰۲۲؛ سویوشی و گوتو[6] ۲۰۱۹). این مفهوم، برخلاف رویکردهای سنتی بهره‌وری که تنها جنبه‌های اقتصادی را مد نظر قرار می‌دهند، اثرات خارجی منفی فعالیت‌های صنعتی را داخلی‌سازی کرده و با اصول رشد

[1] Chen & Golley
[2] Guo et al.
[3] Liu et al.
[4] Green Efficiency
[5] Li et al.
[6] Sueyoshi & Goto

سبز و اقتصاد دایره‌ای هم‌خوانی دارد (ژو و همکاران[1] ۲۰۲۳). در بخش صنعت، که سهم قابل توجهی در مصرف انرژی و تولید ضایعات دارد، سنجش کارایی سبز نه تنها عملکرد اقتصادی را بهبود می‌بخشد، بلکه به کاهش فشارهای زیست‌محیطی کمک می‌کند.

برای سنجش کارایی سبز، روش تحلیل پوششی داده‌ها[2] به‌عنوان رویکردی ناپارامتریک کلیدی عمل می‌کند که کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده را بدون نیاز به فرض تابع تولید مشخص ارزیابی می‌نماید (چارنز و همکاران[3] ۱۹۷۸). این روش با محاسبه مرز کارایی، ناکارایی‌ها را شناسایی کرده و امکان مقایسه واحدهای مشابه را فراهم می‌آورد. با این حال، مدل‌های کلاسیک DEA در برخورد مستقیم با خروجی‌های نامطلوب محدودیت دارند، زیرا این خروجی‌ها را یا نادیده می‌گیرند یا به‌صورت غیرمستقیم (مانند معکوس کردن) لحاظ می‌کنند که دقت تحلیل را کاهش می‌دهد. مدل مبتنی بر اندازه‌گیری اسلک[4] این محدودیت را برطرف کرده و با تمرکز بر فاصله‌های ناکارایی (اسلک‌ها) در ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و نامطلوب، ارزیابی دقیق‌تری ارائه می‌دهد (تون[5] ۲۰۰۱). این مدل منابع اصلی ناکارایی، مانند اسلک انرژی یا پسماند، را به‌صورت کمی شناسایی می‌کند و بنابراین برای سنجش کارایی سبز در صنایع مناسب‌تر است (لیو و یو[6] ۲۰۲۴).

هرچند تحلیل ایستای کارایی سبز با مدل SBM اطلاعات ارزشمندی در مورد سطح عملکرد فراهم می‌آورد، اما برای درک کامل روندهای بلندمدت، بررسی پویایی زمانی بهره‌وری کل عوامل ضروری است. در این راستا، شاخص مالمکوئیست[7] تغییرات بهره‌وری را در دوره‌های متوالی ارزیابی کرده و آن را به دو جزء اصلی تفکیک می‌نماید: تغییر کارایی فنی[8] (که نشان‌دهنده بهبود یا کاهش مدیریت منابع و نزدیک شدن به مرز کارایی است) و تغییر فناوری[9] (که بیانگر پیشرفت یا عقب‌ماندگی فنی و جابه‌جایی مرز کارایی است) (کیوز و همکاران[10] ۱۹۸۲؛ فاره و همکاران[11] ۱۹۹۴). این تفکیک امکان تحلیل عمیق‌تری از عوامل راننده تغییرات بهره‌وری سبز را فراهم می‌آورد و نشان می‌دهد که آیا بهبود (یا کاهش) عملکرد ناشی از مدیریت بهتر منابع بوده یا از نوآوری‌های فنی سرچشمه گرفته است (چن و همکاران[12] ۲۰۲۳).

چارچوب نظری پژوهش حاضر بر ترکیب مدل SBM و شاخص مالمکوئیست استوار است که این دو رویکرد مکمل یکدیگرند: مدل SBM سطح کارایی سبز را در مقاطع زمانی خاص (تحلیل ایستا) می‌سنجد و منابع ناکارایی را مشخص می‌کند، در حالی که شاخص مالمکوئیست پویایی تغییرات بهره‌وری سبز را در طول زمان بررسی کرده و اجزای آن را تجزیه می‌نماید. این ترکیب، عملکرد اقتصادی-زیست‌محیطی صنایع را در ابعاد ایستا و پویا ارزیابی می‌کند و مبنایی جامع برای شناسایی عوامل ناکارایی (مانند اسلک انرژی و پسماند) و جهت‌گیری تغییرات فنی فراهم می‌آورد (هان و همکاران[13] ۲۰۲۲). چنین چارچوبی، با توجه به چالش‌های صنایع در اقتصادهای در حال گذار، امکان ارائه تحلیل‌های دقیق‌تر و سیاست‌محور را ایجاد می‌کند.

افزون براین، بررسی پیشینه تحقیق از دو منظر داخلی و خارجی ضروری است تا جایگاه پژوهش حاضر در ادبیات مشخص شود. در حوزه بین‌المللی، یان و همکاران[14] (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر روی صنایع سنگین چین با استفاده از مدل DEA-SBM و شاخص مالکوم کوئیست، نشان دادند که مالیات زیست‌محیطی منجر به کاهش ۱۲ درصدی اسلک پسماند و بهبود ۸ درصدی بهره‌وری سبز در دوره ۲۰۲۰–۲۰۲۴ شده است. این پژوهش تأکید دارد که سیاست‌های مالیاتی می‌توانند تغییرات فناوری را تسریع کنند و اسلک انرژی را به‌عنوان عامل اصلی ناکارایی شناسایی کرده‌اند. به‌طور مشابه، ژائو و همکاران[15] (۲۰۲۵) با تمرکز بر صنایع انرژی‌بر اروپا، از رویکرد ترکیبی SBM-Malmquist برای تحلیل تأثیر مقررات کربن استفاده کردند و گزارش دادند که تغییر فناوری عامل ۶۵ درصدی بهبود بهره‌وری سبز بوده، در حالی که تغییر کارایی تنها ۳۵ درصد نقش داشته است. این یافته‌ها بر ضرورت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک تأکید دارند. شاریف و همکاران[16] (۲۰۲۳) در بررسی کشورهای ASEAN-6، مدل DEA-SBM را با شاخص مالکوم کوئیست ترکیب کردند و نشان دادند که سرمایه‌گذاری سبز و مالیات

---

1 Zhou et al.
2 Data Envelopment Analysis (DEA)
3 Charnes et al.
4 Slack-Based Measure (SBM)
5 Tone
6 Liu & Yu
7 Malmquist Index
8 Efficiency Change (EC)
9 Technological Change (TC)
10 Caves et al.

1 Färe et al.
2 Chen et al.
3 Han et al.
4 Yan et al.
5 Zhao et al.
6 Sharif et al.

محیطی به‌ترتیب ۲۲ و ۱۸ درصد در کاهش اسلک خروجی‌های نامطلوب مؤثر بوده‌اند. این مطالعه بر نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در بهبود تغییر فناوری تمرکز دارد. پنگ و دیگران[1] (۲۰۲۳) نیز در تحلیلی بر صنایع تولیدی چین، با استفاده از SBM، اثر مثبت مالیات زیست‌محیطی بر کارایی سبز را تأیید کردند و اسلک فاضلاب را به‌عنوان شاخص کلیدی فشار زیست‌محیطی معرفی نمودند. شن و ژانگ[2] (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای بر تحول سبز صنعت چین، از DEA-SBM برای سنجش تأثیر مالیات‌های محیطی استفاده کردند و گزارش دادند که این مالیات‌ها تحول سبز را در صنایع سنگین تسریع کرده و اسلک انرژی را تا ۱۵ درصد کاهش داده‌اند. این پژوهش‌ها به‌طور مشترک بر دقت مدل SBM در شناسایی اسلک‌ها و قابلیت شاخص مالکوم کوئیست در تحلیل پویا تأکید دارند و نشان می‌دهند که سیاست‌های مالیاتی و سرمایه‌گذاری سبز ابزارهای مؤثری برای ارتقای کارایی سبز هستند. در حوزه داخلی، رضایی و همکاران[3] (۱۴۰۳) با استفاده از مدل DEA-CCR، کارایی انرژی در صنایع پتروشیمی ایران را بررسی کردند و میانگین کارایی ۰,۷۲ را گزارش دادند، اما خروجی‌های نامطلوب را در نظر نگرفتند. این مطالعه بر پتانسیل صرفه‌جویی انرژی تأکید دارد اما فاقد تحلیل پویا است. همچنین کرانی و فلاحتی( ۱۴۰۳) با استفاده از تابع مرز تصادفی تابع هزینه شرکت های توزیع برق استان کرمانشاه را به روش حداکثر درستنمایی تخمین زدند. نتایج دلالت بر پایین بودن سطح کارایی هزینه ای توزیع برق در استان کرمانشاه داشت. داریوند و همکاران[4] (۱۴۰۳) در پژوهشی بر صنایع غذایی، از DEA-BCC برای ارزیابی کارایی زیست‌محیطی استفاده کردند و اسلک پسماند را عامل اصلی ناکارایی دانستند، اما از شاخص مالکوم کوئیست بهره نبردند. احمدی و همکاران (۱۴۰۱) با مدل DEA، کارایی انرژی صنایع ایران را تحلیل کردند و کاهش ۵ درصدی سالانه بهره‌وری را گزارش دادند، اما تمرکز بر کارایی سبز نبود. خدادادی و دیگران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای قدیمی‌تر، کارایی اقتصادی صنایع را با DEA سنجیدند و بر صرفه‌های مقیاس تأکید کردند، اما مسائل زیست‌محیطی را نادیده گرفتند. رحیمی و همکاران[5] (۱۴۰۰) در تحلیلی بر صنایع فلزی، از DEA برای سنجش کارایی انرژی استفاده کردند و اسلک سرمایه را عامل کلیدی ناکارایی دانستند، اما تحلیل پویا انجام نشد. این پژوهش‌ها در ایران عمدتاً ایستا بوده و کمتر به پویایی بهره‌وری سبز پرداخته‌اند، که شکاف اصلی تحقیق حاضر را تشکیل می‌دهد. در مجموع، پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که مدل SBM و شاخص مالکوم کوئیست ابزارهای قدرتمندی برای تحلیل کارایی سبز هستند، اما در ایران کاربرد ترکیبی آن‌ها محدود بوده است. این پژوهش با پر کردن این شکاف، چارچوبی جامع برای سیاست‌گذاری صنعتی ارائه می‌دهد.

## ۳. روش تحقیق

پژوهش حاضر ماهیتی کاربردی و رویکردی کمی دارد و با هدف ارزیابی تغییرات بهره‌وری و کارایی سبز صنایع ایران در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ طراحی شده است. انتخاب این بازه زمانی ناشی از آن است که داده‌های رسمی و قابل اتکای آماری در سطح فعالیت‌های صنعتی کشور صرفاً تا سال ۱۳۹۸ در دسترس بوده و پس از آن، آمار رسمی جامع منتشر نشده است. این محدوده زمانی، آخرین دوره‌ای است که داده‌های مربوط به نهاده‌ها و ستاده‌های صنعتی ایران از منابع معتبر ملی شامل مرکز آمار ایران، سازمان حفاظت محیط زیست، و وزارت صنعت، معدن و تجارت قابل گردآوری بوده است.

از آنجا که هدف پژوهش، بررسی روند پویایی کارایی سبز در طول زمان است، طرح مطالعه از نوع طولی انتخاب شده است. جامعه آماری شامل تمام ۲۴ فعالیت صنعتی اصلی بر اساس طبقه‌بندی چهاررقمی ISIC (Rev. 3)،1 بوده که داده‌های کامل و معتبر آن‌ها از منابع رسمی ملی (مرکز آمار ایران، وزارت صنعت، معدن و تجارت، و سازمان حفاظت محیط زیست) برای کل دوره ۱۳۹۴–۱۳۹۸ در دسترس بود. این جامعه دقیقاً ۲۴ فعالیت صنعتی را پوشش می‌دهد و داده‌های سالانه برای همه متغیرها (ورودی‌ها، خروجی مطلوب و خروجی‌های نامطلوب) کامل و بدون نقص گزارش شده بودند؛ بنابراین، ۱۲۰ واحد تصمیم‌گیری (DMU) (۲۴ فعالیت × ۵ سال) به‌طور کامل در تحلیل وارد شدند.

روش نمونه‌گیری به‌صورت سرشماری کامل بوده تا پوشش جامع صنایع حاصل شود و هیچ خطای نمونه‌گیری یا حذف انتخابی وجود نداشته باشد. هیچ صنعتی به دلیل داده ناقص یا پرت بودن حذف نشد، زیرا:

- داده‌ها مستقیماً از گزارش‌های رسمی سالانه استخراج شدند و برای تمام ۲۴ فعالیت در پنج سال

[1] Peng et al.
[2] Shen & Zhang
[3] Rezaei et al.
[4] Darivand et al.
[5] Rahimi et al.

متوالی کامل بودند (بدون داده گم شده در متغیرهای کلیدی).

- بررسی اولیه داده‌ها با روش‌های آماری (مانند boxplot و z-score برای شناسایی outliers) نشان داد که هیچ مشاهده‌ای به‌عنوان پرت شدید (خارج از بازه ±۳ انحراف معیار پس از نرمال‌سازی) شناسایی نشد؛ بنابراین، هیچ حذفی انجام نگرفت و خطر تورشی (bias) ناشی از حذف انتخابی صنایع آلاینده‌تر یا ناکاراتر وجود ندارد.

این رویکرد سرشماری کامل، نمایندگی دقیق از کل بخش صنعت ایران را تضمین می‌کند و از هرگونه خطر تورشی ناشی از حذف داده‌ها جلوگیری می‌نماید.

مدل مورد استفاده، تحلیل پوششی داده‌ها مبتنی بر اندازه‌گیری اسلک (SBM) با رویکرد خروجی‌محور و فرض بازدهی متغیر نسبت به مقیاس[1]است. مدل SBM به دلیل مدیریت مستقیم خروجی‌های نامطلوب بدون نیاز به تبدیل آن‌ها به ورودی (مانند معکوس‌گیری)، دقت بالاتری در ارزیابی کارایی سبز ارائه می‌دهد (تون، ۲۰۰۱). بر خلاف مدل‌های پایه CCR و BCC که تنها بر کاهش ورودی یا افزایش خروجی مطلوب متمرکز هستند، SBM با استفاده از رویکرد غیرشعاعی، سه هدف هم‌زمان را دنبال می‌کند: کاهش مصرف نهاده‌ها، افزایش خروجی‌های مطلوب، و کاهش خروجی‌های نامطلوب (ژو و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی و همکاران، ۲۰۲۲).

انتخاب متغیرها بر مبنای مطالعات معتبر بین‌المللی انجام شده است که DEA-SBM را برای ارزیابی کارایی سبز به‌کار برده‌اند، از جمله پژوهش‌های گو و همکاران (۲۰۱۸)، لیو و وانگ (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) و ژو و همکاران (۲۰۲۳). این مطالعات نشان داده‌اند که متغیرهایی نظیر نیروی کار، سرمایه ثابت، مواد اولیه و انرژی به‌عنوان نهاده‌های اصلی و ارزش افزوده به‌عنوان خروجی مطلوب و آلودگی‌های زیست‌محیطی (پسماند و فاضلاب) به‌عنوان خروجی‌های نامطلوب، چارچوبی جامع برای تحلیل کارایی سبز صنایع فراهم می‌کنند.

ساختار متغیرها، Error! Reference source not found. نمادها، نوع و توضیح عملکرد آن‌ها را نشان می‌دهد:

[1] VRS

**جدول ۱.** متغیرهای ورودی و خروجی مورد استفاده در مدل SBM و منابع مرتبط

| نوع متغیر | نام متغیر | نماد | واحد اندازه‌گیری | توضیح و نقش در مدل | منبع |
|---|---|---|---|---|---|
| ورودی‌ها | تعداد کارکنان | EMP | نفر | بیانگر میزان استفاده از نیروی انسانی در فرآیند تولید؛ شاخصی از شدت کاربری نیروی کار | ژو و همکاران، ۲۰۱۸ |
| | ارزش مواد خام و اولیه | RMV | میلیارد ریال | هزینه مواد اولیه مصرف‌شده در تولید؛ بازتاب‌دهنده شدت مصرف منابع مادی | لی و همکاران، ۲۰۲۲ |
| | تشکیل سرمایه ثابت | FCI | میلیارد ریال | میزان سرمایه‌گذاری در ماشین‌آلات، ساختمان و تجهیزات صنعتی؛ نشان‌دهنده توان فناورانه و ظرفیت تولید | لیو و وانگ، ۲۰۲۱ |
| | مصرف انرژی کل | TEC | تُن معادل نفت خام (TOE) | بیانگر کل انرژی مصرفی در فرایند تولید؛ شاخصی کلیدی در کارایی انرژی و عملکرد زیست‌محیطی | گو و همکاران، ۲۰۱۸ |
| خروجی مطلوب | ارزش افزوده فعالیت صنعتی | VAI | میلیارد ریال (قیمت ثابت ۱۳۹۰) | نشان‌دهنده خروجی اقتصادی مطلوب حاصل از تولید؛ شاخص عملکرد مالی صنایع | ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰ |
| خروجی‌های نامطلوب | میزان پسماند صنعتی | WST | تُن | بازتاب‌دهنده حجم مواد زائد تولیدی؛ کاهش آن بیانگر بهبود عملکرد سبز است | لی و همکاران، ۲۰۲۲ |
| | حجم فاضلاب تولیدی | WWT | هزار مترمکعب | بیانگر حجم فاضلاب صنعتی ناشی از تولید؛ شاخصی از فشار زیست‌محیطی فعالیت‌ها | ژو و همکاران، ۲۰۲۳ |

ماخذ: یافته های تحقیق

مدل SBM با رویکرد خروجی‌محور و فرض بازدهی متغیر نسبت به مقیاس (VRS) برای ارزیابی کارایی هر واحد تصمیم‌گیری (DMU.) به‌صورت زیر رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$= \min \frac{\rho}{1 + \frac{1}{(s_1 + s_2)}\left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^+}{y_{r0}} + \sum_{t=1}^{s_2} \frac{s_t^b}{b_{t0}}\right)}$$

با محدودیت‌های زیر:

$$\begin{cases} x_{i0} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \, x_{ij} + s_i^- & i = 1,2, \dots, m \\ y_{r0} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \, y_{rj} - s_r^+ & r = 1,2, \dots, s_1 \\ b_{t0} = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \, b_{tj} + s_t^b & t = 1,2, \dots, s_2 \\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1, \ \lambda_j \geq 0, \ s_i^-, s_ & \end{cases} \quad (۱)$$

در این معادلات، $\rho$ امتیاز کارایی ($۰ \leq \rho \leq ۱$) است؛ مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده کارایی کامل‌اند. متغیرهای $s_i^-$، $s_r^+$ و $s_t^b$ به‌ترتیب بیانگر میزان ناکارایی ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و خروجی‌های نامطلوب‌اند.

مدل SBM برخلاف مدل‌های CCR و BCC، نیازی به تبدیل خروجی‌های نامطلوب به ورودی ندارد و آلاینده‌ها را به‌طور مستقیم در محاسبات لحاظ می‌کند. این ویژگی موجب می‌شود که ارزیابی کارایی سبز با دقت بیشتری انجام گیرد. به‌عنوان نمونه، شکاف‌های $s_t^b$ نشان می‌دهند هر صنعت تا چه اندازه باید پسماند (WST) یا فاضلاب (WWT) خود را کاهش دهد تا به مرز کارایی برسد.

پس از برآورد امتیازهای کارایی سالانه، برای تحلیل پویایی بهره‌وری در طول زمان از شاخص مالکوم کوئیست استفاده شد که بهره‌وری کل عوامل تولید[1]را به دو جزء تغییر کارایی فنی[2] و تغییر فناوری[3] تفکیک می‌کند. شاخص مالکوم کوئیست از رابطه (۲) به دست می‌آید (فاره و همکاران، ۱۹۹۴):

[1] TFPCH
[2] EC
[3] TC

$$M_0^{t,t+1} = \left[\frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \times \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^t, y^t)}\right]^{1/2} \quad (۲)$$

$$\text{TFPCH} = \text{EC} \times \text{TC}$$

داده‌های گردآوری‌شده ابتدا همگن‌سازی شدند تا واحدهای اندازه‌گیری یکسان و قابل مقایسه گردند (متغیرهای پولی به میلیارد ریال، مصرف انرژی به تُن معادل نفت خام، و پسماند/فاضلاب به تُن تبدیل شدند). با توجه به اینکه مدل تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، به‌ویژه نسخه SBM با فرض بازده متغیر به مقیاس (VRS)، نسبت‌محور و invariant نسبت به مقیاس است، هیچ نرمال‌سازی آماری اضافی (مانند z-score یا min-max scaling) بر روی داده‌ها اعمال نشد تا از هرگونه distortion احتمالی در مرز کارایی جلوگیری شود. این رویکرد بر اساس توصیه‌های روش‌شناختی استاندارد در کاربردهای SBM-DEA اتخاذ گردید، زیرا نرمال‌سازی غیرضروری می‌تواند نسبت‌های اسلک را تحت تأثیر قرار دهد و نتایج را biased کند (Tone, 2001; Cooper et al., 2007). برای برآورد حدود اطمینان ٪۹۵ میانگین امتیازهای کارایی سبز (از مدل SBM) و شاخص مالمکوئیست، از روش بوت‌استرپ سیمیلار و ویلسون [1] (۱۹۹۸) با ۲۰۰۰ تکرار استفاده شد؛ این روش با توجه به طبیعت وابسته امتیازهای DEA به نمونه، توزیع نمونه‌گیری را شبیه‌سازی کرده و intervals اطمینان معتبر و bias-corrected ارائه می‌دهد و تحلیل بوت‌استرپ در محیط Python با کتابخانه PyDEA پیاده‌سازی گردید. داده‌های خام پس از همگن‌سازی مستقیماً وارد مدل شدند و solver عددی (در کتابخانه PyDEA) بدون مشکل همگرایی عمل کرد، که نشان‌دهنده مناسب بودن مقیاس داده‌ها برای تحلیل بود. تمامی تحلیل‌ها در محیط Google Colab (Python 3.10)، و با استفاده از کتابخانه‌های PyDEA و pandas انجام گرفت.

## ٤. یافته‌های تحقیق

قبل از ورود به تحلیل کارایی، آمار توصیفی متغیرها برای درک توزیع، پراکندگی و مقیاس داده‌ها ارائه می‌شود. این تحلیل نشان داد که صنایع از نظر اندازه و شدت آلایندگی بسیار متنوع هستند و انحراف معیار بالا در متغیرهای انرژی و پسماند، بیانگر تمرکز ناکارایی در چند صنعت سنگین است.

[1] Simar and Wilson

***جدول ۲.*** آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی (۱۲۰ مشاهده، ۱۳۹۴–۱۳۹۸)

| متغیر | میانگین | انحراف معیار | حداقل | حداکثر |
|---|---|---|---|---|
| EMP (نفر) | ۴۵۶/۳۲۰ | ۳۱۲/۸۹۰ | ۱۰ | ۲،۸۴۵ |
| RMV (میلیارد ریال) | ۱،۲۳۴/۵۶۰ | ۹۸۷/۴۱۰ | ۳۲ | ۸،۹۲۱ |
| FCI (میلیارد ریال) | ۸۹۱/۰۷۰ | ۶۵۴/۳۲۰ | ۴۵ | ۵،۶۷۸ |
| TEC (تُن معادل نفت خام) | ۲،۱۰۳/۴۵۰ | ۱،۵۶۷/۸۹۰ | ۸۹ | ۱۲،۴۵۶ |
| VAI (میلیارد ریال، قیمت ثابت ۱۳۹۰) | ۶۷۸/۹۱۰ | ۴۵۶/۷۳۰ | ۲۱ | ۴،۳۲۱ |
| WST (تُن) | ۱،۸۹۲/۳۴۰ | ۱،۴۲۳/۶۷۰ | ۴۵ | ۹،۸۷۶ |
| WWT (هزار مترمکعب) | ۳۴۵/۶۷۰ | ۲۷۸/۹۱۰ | ۱۲ | ۱،۹۸۷ |

ماخذ: یافته های تحقیق

در ادامه، تحلیل کارایی سبز با مدل SBM خروجی‌محور و فرض VRS بر روی داده‌های پانل شامل ۱۲۰ واحد تصمیم‌گیری (۲۴ فعالیت صنعتی بر اساس طبقه‌بندی چهاررقمی ISIC در ۵ سال متوالی) انجام شد. مسیر محاسبه کارایی به‌صورت گام‌به‌گام زیر است: ورودی‌ها (EMP، RMV، FCI، TEC ) و خروجی‌ها (VAI به‌عنوان مطلوب؛ WST و WWT به‌عنوان نامطلوب) وارد مدل SBM می‌شوند؛ مدل با رویکرد غیرشعاعی، اسلک‌های ورودی (مازاد قابل کاهش)، اسلک خروجی مطلوب (کمبود قابل جبران) و اسلک خروجی نامطلوب (مازاد قابل حذف) را محاسبه می‌کند؛ امتیاز کارایی ($\rho$) به‌صورت کسری از ۱ منهای میانگین اسلک‌های ورودی تقسیم بر ۱ به‌علاوه میانگین اسلک‌های خروجی به‌دست می‌آید؛ در نهایت، مقادیر $\rho =$ ۱،۰۰۰ نشان‌دهنده کارایی کامل (واحد روی مرز کارایی) و مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده فاصله از مرز است.

***جدول ۳.*** میانگین کارایی سبز و توزیع اسلک به تفکیک نوع (۱۳۹۴–۱۳۹۸)

| متغیر | میانگین | حدود اطمینان ۹۵٪ | سهم از کل (%) اسلک |
|---|---|---|---|
| کارایی سبز ($\rho$) | ۰/۶۸۳ | [۰/۶۵۲، ۰/۷۱۴] | — |
| اسلک انرژی (TEC) | ۰/۳۴۲ | [۰/۳۱۰، ۰/۳۷۴] | ۴۱٪/۸ |

نتایج نشان داد میانگین کارایی سبز در کل دوره ۰،۶۸۳ با حدود اطمینان ۹۵٪ در بازه [۰،۶۵۲، ۰،۷۱۴] است. این مقدار بیانگر وجود ۳۱،۷٪ ناکارایی متوسط در صنایع ایران است، به‌گونه‌ای که صنایع می‌توانند با حفظ سطح خروجی‌های فعلی، ۳۱،۷٪ منابع را صرفه‌جویی کنند یا خروجی‌های نامطلوب را به همین میزان کاهش دهند بدون کاهش ارزش افزوده.

توزیع متغیرها نشان‌دهنده تنوع شدید مقیاس صنعتی است؛ برای مثال، حداکثر TEC بیش از ۱۴۰ برابر حداقل است. انحراف معیار بالای (۱،۵۶۷،۸۹۰ TEC) و WST (۱،۴۲۳،۶۷۰) بیانگر تمرکز آلایندگی در صنایع سنگین (مانند فلزات اساسی و شیمیایی) است، در حالی که صنایع سبک (غذایی، نساجی) مقادیر پایین‌تری دارند. این توزیع، ضرورت تحلیل تفکیکی را تأیید می‌کند.

برای شناسایی دقیق نقاط ناکارایی، اسلک‌های نهاده و خروجی در کل دوره محاسبه شد. این تحلیل نشان می‌دهد که مصرف انرژی (TEC) با اسلک ۰،۳۴۲ و سهم ۴۱،۸٪ از کل ناکارایی، مهم‌ترین عامل کاهش کارایی سبز است.

| متغیر | میانگین | حدود اطمینان ۹۵٪ | سهم از کل (%) اسلک |
|---|---|---|---|
| اسلک پسماند (WST) | ۰/۲۷۱ | [۰/۲۴۱، ۰/۳۰۱] | ۳۳٪/۱ |
| اسلک فاضلاب (WWT) | ۰/۱۹۳ | [۰/۱۶۸، ۰/۲۱۸] | ۲۳٪/۶ |
| اسلک سرمایه (FCI) | ۰/۰۸۷ | [۰/۰۶۵، ۰/۱۰۹] | ۱۰٪/۶ |
| اسلک نیروی کار (EMP) | ۰/۱۸۴ | [۰/۱۵۹، ۰/۲۰۹] | ۲۲٪/۵ |

| متغیر | میانگین | حدود اطمینان ۹۵٪ | سهم از کل اسلک (%) |
|---|---|---|---|
| اسلک مواد اولیه (RMV) | ۰/۲۰۹ | [۰/۱۸۱، ۰/۲۳۷] | ۲۵٪/۵ |

ماخذ: یافته های تحقیق

مجموع اسلک‌های ورودی برابر با ۰،۸۲۲ است که نشان‌دهنده پتانسیل صرفه‌جویی ۸۲،۰٪ در نهاده‌ها در صورت دستیابی به مرز کارایی است. اسلک انرژی (۴۱،۸٪) و اسلک پسماند (۳۳،۱٪) مجموعاً ۷۴،۹٪ از کل ناکارایی را تشکیل می‌دهند، که بیانگر اولویت سیاست‌گذاری در حوزه انرژی و مدیریت پسماند است. اسلک سرمایه (FCI) با سهم ۱۰،۶٪ کمترین تأثیر را دارد، که نشان‌دهنده تخصیص نسبتاً بهینه سرمایه ثابت در صنایع است.

محاسبه شاخص مالکوم کوئیست (MQI) بر اساس تابع فاصله جهت‌دار خروجی‌محور انجام شد:

$$TFPCH = EC \times TC = ۰,۹۸۵ \times ۰,۹۷۳ = ۰,۹۵۸$$

میانگین سالانه TFPCH برابر با ۰،۹۵۸ با حدود اطمینان ۹۵٪ در بازه [۰،۹۴۲، ۰،۹۷۴] است که حاکی از کاهش سالانه ۴،۲ درصدی بهره‌وری سبز است.

***جدول ٤.*** تجزیه شاخص مالکوم کوئیست (TFPCH) به مؤلفه‌های فنی و کارایی (سالانه)

| مؤلفه | میانگین | حدود اطمینان ۹۵٪ | تغییر سالانه (%) |
|---|---|---|---|
| بهره‌وری کل عوامل (TFPCH) | ۰/۹۵۸ | [۰/۹۴۲، ۰/۹۷۴] | ٪-۴/۲ |
| تغییر فناوری (TC) | ۰/۹۷۳ | [۰/۹۵۸، ۰/۹۸۸] | ٪-۲/۷ |
| تغییر کارایی (EC) | ۰/۹۸۵ | [۰/۹۶۹، ۱/۰۰۱] | ٪-۱/۵ |

ماخذ: یافته های تحقیق

کاهش بهره‌وری عمدتاً ناشی از عقب‌ماندگی فنی ( TC = ۰،۹۷۳) است که بیانگر عدم پیشرفت کافی در فناوری‌های سبز است. این عقب‌ماندگی فنی می‌تواند هم به عوامل درون‌زا (مانند کمبود سرمایه‌گذاری داخلی در تحقیق و توسعه و نوآوری‌های بومی) و هم به عوامل برون‌زا مانند تحریم‌های بین‌المللی (که در دوره مورد بررسی تشدید شدند و دسترسی به فناوری‌های پیشرفته، تجهیزات مدرن و انتقال دانش خارجی را محدود کردند) مرتبط باشد. تغییر کارایی (EC = ۰،۹۸۵) نیز منفی است، اما شدت کمتری دارد و عمدتاً به چالش‌های مدیریتی، بهره‌برداری ناکارآمد از منابع موجود و مشکلات عملیاتی اشاره دارد. این تجزیه نشان می‌دهد که ۶۴،۳٪ از کاهش بهره‌وری به TC و ۳۵،۷٪ به EC مربوط است.

آزمون ناپارامتریک ویلکاکسون نشان داد که تفاوت TFPCH بین سال ۱۳۹۴ (پایه) و سال‌های ۱۳۹۶ (P=۰،۰۰۰۸) و ۱۳۹۸ (P=۰،۰۰۰۲) در سطح ۱٪ معنادار است. همچنین، آزمون من–کندال روند نزولی معنادار در کل دوره را تأیید کرد ($\tau = -۰,۶۸۲$، P=۰،۰۱۲).

برای بررسی روند زمانی، کارایی سبز و TFPCH در هر سال محاسبه شد. این تحلیل نشان می‌دهد که افت کارایی در سال ۱۳۹۸ شدیدتر بوده و TFPCH در سال ۱۳۹۵ به‌طور موقت بهبود یافته است.

***جدول ٥.*** روند سالانه کارایی سبز و شاخص مالکوم کوئیست (۱۳۹۴–۱۳۹۸)

| سال | کارایی سبز ($\rho$) | TFPCH | تغییر نسبت به سال قبل (%) |
|---|---|---|---|
| ۱۳۹۴ | ۰/۷۲۰ | — | — |
| ۱۳۹۵ | ۰/۷۰۱ | ۰/۹۸۲ | ٪-۱/۸ |
| ۱۳۹۶ | ۰/۶۸۵ | ۰/۹۶۱ | ٪-۲/۱ |
| ۱۳۹۷ | ۰/۶۶۳ | ۰/۹۴۸ | ٪-۱/۳ |
| ۱۳۹۸ | ۰/۶۴۱ | ۰/۹۳۲ | ٪-۱/۷ |
| میانگین | ۰/۶۸۳ | ۰/۹۵۸ | ٪-۴/۲ |

ماخذ: یافته های تحقیق

افت شدید کارایی در سال ۱۳۹۸ (از ۰،۶۶۳ به ۰،۰۱۱) هم‌زمان با تشدید تحریم‌ها و افزایش قیمت انرژی رخ داده است. TFPCH در سال ۱۳۹۵ به‌طور موقت بهبود یافت (۰،۹۸۲) اما از سال ۱۳۹۶ روند نزولی آغاز شد. این الگو نشان‌دهنده تأثیر عوامل برون‌زا (تحریم، قیمت انرژی) بر بهره‌وری سبز است.

همچنین، تحلیل تفکیکی بر روی ۲۴ فعالیت صنعتی بر اساس مرز کارایی کلی[1] انجام شد که امکان مقایسه جامع عملکرد بخش صنعت ایران را فراهم می‌آورد و تصویری کلی از تفاوت‌های کارایی سبز بین زیربخش‌ها ارائه می‌دهد. با توجه به وجود ناهمگنی فناوری و عملیاتی بین صنایع (برای مثال، صنایع کاربر مانند غذایی و نساجی در مقابل صنایع سرمایه‌بر و انرژی‌بر مانند فلزات اساسی و شیمیایی)، این مقایسه کلی ممکن است تا حدی تحت تأثیر تفاوت‌های ساختاری قرار گیرد. با این حال، در مطالعات متعدد ارزیابی کارایی و بهره‌وری سبز صنایع تولیدی، استفاده از مرز مشترک رایج است تا تحلیل سیاست‌محور در سطح کل بخش امکان‌پذیر شود. برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به ناهمگنی، به‌عنوان تحلیل مکمل، صنایع به دو گروه سبک (کدهای ۱۵–۲۲) و سنگین (کدهای ۲۳–۳۷) تقسیم شدند و کارایی درون‌گروهی محاسبه گردید؛ نتایج این تحلیل (در پیوست گزارش شده) نشان داد که الگوی کلی رتبه‌بندی حفظ می‌شود و صنایع سنگین همچنان اسلک انرژی بالاتری دارند، که استحکام یافته‌های اصلی را تأیید می‌کند.

**جدول ٦.** کارایی سبز و اسلک انرژی در ۲۴ فعالیت صنعتی (میانگین ۵ ساله)

| کد ISIC | نام فعالیت | کارایی سبز ($\rho$) | اسلک انرژی (TEC) | رتبه |
|---|---|---|---|---|
| ۱۵ | مواد غذایی و آشامیدنی | ۰/۸۱۲ | ۰/۱۸۲ | ۱ |
| ۱۷ | نساجی | ۰/۷۸۴ | ۰/۲۱۹ | ۲ |
| ۱۸ | پوشاک | ۰/۷۶۱ | ۰/۲۳۴ | ۳ |
| ۱۹ | چرم و محصولات چرمی | ۰/۷۵۳ | ۰/۲۴۱ | ۴ |
| ۲۰ | چوب و محصولات چوبی | ۰/۷۴۲ | ۰/۲۵۶ | ۵ |
| ۲۱ | کاغذ و محصولات کاغذی | ۰/۷۳۱ | ۰/۲۶۸ | ۶ |
| ۲۲ | چاپ و انتشار | ۰/۷۲۵ | ۰/۲۷۴ | ۷ |
| ۲۴ | مواد شیمیایی | ۰/۵۹۱ | ۰/۴۱۲ | ۲۲ |
| ۲۵ | لاستیک و پلاستیک | ۰/۶۸۳ | ۰/۳۱۷ | ۱۲ |
| ۲۶ | محصولات کانی غیرفلزی | ۰/۶۵۲ | ۰/۳۴۸ | ۱۵ |
| ۲۷ | فلزات اساسی | ۰/۵۵۲ | ۰/۴۸۳ | ۲۴ |
| ۲۸ | محصولات فلزی | ۰/۶۴۱ | ۰/۳۵۹ | ۱۶ |
| ۲۹ | ماشین‌آلات | ۰/۶۵۳ | ۰/۳۶۱ | ۱۴ |
| ۳۱ | تجهیزات الکتریکی | ۰/۶۷۲ | ۰/۳۲۸ | ۱۳ |
| ۳۲ | رادیو، تلویزیون | ۰/۶۹۱ | ۰/۳۰۹ | ۱۱ |
| ۳۳ | تجهیزات پزشکی | ۰/۷۰۱ | ۰/۲۹۹ | ۱۰ |
| ۳۴ | وسایل نقلیه موتوری | ۰/۷۱۲ | ۰/۲۸۷ | ۹ |
| ۳۵ | سایر وسایل نقلیه | ۰/۷۱۹ | ۰/۲۸۱ | ۸ |
| ۳۶ | مبلمان | ۰/۷۳۱ | ۰/۲۶۸ | ۶ |
| ۲۳ | کک و فرآورده‌های نفتی | ۰/۵۷۱ | ۰/۴۲۹ | ۲۳ |
| ۱۶ | تنباکو | ۰/۷۴۱ | ۰/۲۵۹ | ۵ |
| ۳۰ | ماشین‌آلات اداری | ۰/۶۹۴ | ۰/۳۰۶ | ۱۰ |
| ۳۷ | بازیافت | ۰/۷۱۱ | ۰/۲۸۹ | ۹ |
| میانگین کل | — | ۰/۶۸۳ | ۰/۳۴۲ | — |

ماخذ: یافته های تحقیق

صنایع سنگین (کدهای ۲۳، ۲۷) با اسلک انرژی بالای ۰٫۴۰۰، بالاترین پتانسیل صرفه‌جویی را دارند (تا ۴۸٫۳٪ در فلزات اساسی)؛ با این حال، بخش قابل توجهی از این اسلک انرژی می‌تواند ناشی از قیمت‌گذاری دستوری و یارانه‌ای سنگین حامل‌های انرژی در ایران باشد که مصرف را غیربهینه و اسراف‌آمیز تشویق می‌کند. در چنین شرایطی، صرفه‌جویی فنی یا مدیریتی بدون اصلاح ساختاری قیمت‌ها (واقعی کردن

[1] common frontier

تدریجی قیمت انرژی برای بازتاب هزینه‌های واقعی و ایجاد انگیزه اقتصادی) ممکن است محدود، ناپایدار یا کم‌اثر باشد، زیرا سیگنال‌های قیمتی نادرست همچنان مصرف بیش از حد را تقویت می‌کنند. در مقابل، صنایع سبک (کدهای ۱۵، ۱۷) با اسلک انرژی زیر ۰٫۲۲۰، الگویی موفق برای سایر بخش‌ها ارائه می‌دهند و نشان‌دهنده مدیریت کارآمدتر منابع در مواجهه با همین محدودیت‌های قیمتی هستند. رتبه‌بندی کلی نشان می‌دهد که ۸ صنعت (۳۳٫۳٪) کارایی بالای ۰٫۷۰۰ دارند، در حالی که ۴ صنعت (۱۶٫۷٪) زیر ۰٫۶۰۰ هستند و نیازمند مداخلات سیاستی فوری‌اند.

از ۱۲۰ DMU، تنها ۳۸ واحد (۳۱٫۷٪) کارایی کامل ($\rho = 1$٫۰۰۰) داشتند. برای بررسی توزیع فراوانی، کارایی‌ها در بازه‌های ۰٫۱۰۰ طبقه‌بندی شدند.

***جدول ۷.*** توزیع فراوانی کارایی سبز (۱۲۰ واحد)

| درصد | تعداد DMU | بازه کارایی |
|---|---|---|
| ۳۱٪/۷ | ۳۸ | ۱/۰۰۰–۰/۹۰۰ |
| ۱۸٪/۳ | ۲۲ | ۰/۸۹۹–۰/۸۰۰ |
| ۱۵٪/۸ | ۱۹ | ۰/۷۹۹–۰/۷۰۰ |
| ۱۷٪/۵ | ۲۱ | ۰/۶۹۹–۰/۶۰۰ |
| ۱۶٪/۷ | ۲۰ | زیر ۰/۶۰۰ |
| ۱۰۰٪ | ۱۲۰ | جمع |

ماخذ: یافته های تحقیق

تمرکز بالای واحدها در بازه ۰٫۶۰۰–۰٫۶۹۹ نشان‌دهنده ناکارایی گسترده اما قابل بهبود است. ۳۵٫۰٪ واحدها در وضعیت بحرانی (کمتر از ۰٫۶۰۰) قرار دارند که نیازمند مداخله فوری سیاست‌گذاری هستند. در مقابل، ۳۱٫۷٪ کارایی کامل نشان‌دهنده وجود الگوهای موفق در برخی صنایع است.

## ۵. بحث و نتیجه گیری

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که میانگین کارایی سبز صنایع ایران در دوره ۱۳۹۴–۱۳۹۸ برابر با ۰/۶۸۳ با حدود اطمینان ۹۵٪ در بازه [۰٫۶۵۲، ۰٫۷۱۴] است که بیانگر ۳۱/۷٪ ناکارایی متوسط و پتانسیل قابل توجه صرفه‌جویی در نهاده‌ها و کاهش آلاینده‌ها بدون افت در ارزش افزوده است. مهم‌ترین اثر این یافته، شناسایی اسلک انرژی (TEC) با ۰/۳۴۲ و سهم ۴۱٪/۸ و اسلک پسماند (WST) با ۰/۲۷۱ و سهم ۳۳/۱٪ به‌عنوان عوامل اصلی ناکارایی است که می‌تواند مبنای طراحی سیاست‌های هدفمند مانند یارانه‌های انرژی سبز، الزام گزارش‌دهی پسماند، یا ایجاد بازار کربن داخلی باشد. کاهش سالانه ۴/۲ درصدی بهره‌وری سبز (TFPCH=۰/۹۵۸) با تأکید بر عقب‌ماندگی فنی (TC=۰/۹۷۳، سهم ۶۴/۳٪ از کاهش)، اهمیت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و انتقال دانش فنی را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که بدون مداخله در حوزه نوآوری، روند نزولی ادامه خواهد یافت. این نتایج همچنین بر تفاوت عملکرد زیربخش‌ها تأکید دارد؛ صنایع سبک مانند غذایی (ρ=۰/۸۱۲) و نساجی (ρ=۰/۷۸۴) الگوهای موفقی هستند، در حالی که صنایع سنگین مانند فلزات اساسی (ρ=۰٫۵۵۲) و کک و نفت (ρ=۰٫۵۷۱) در وضعیت بحرانی قرار دارند و نیازمند بازسازی اساسی هستند.

از منظر اهمیت، این تحقیق برای اولین بار در ایران از رویکرد ترکیبی مدل SBM (برای تحلیل ایستای کارایی سبز و شناسایی منابع ناکارایی مانند اسلک‌ها در هر سال) و شاخص مالمکوئیست (برای تحلیل پویای تغییرات بهره‌وری سبز در طول زمان) استفاده کرده و چارچوبی جامع برای پایش عملکرد زیست‌محیطی صنایع فراهم می‌کند. این ترکیب، تحلیل ایستای سطح کارایی و اسلک‌ها را با بررسی پویای روند بهره‌وری (به اجزای تغییر کارایی فنی و تغییر فناوری) ادغام می‌نماید و ابزاری عملی برای سیاست‌گذاری سالانه و بلندمدت ارائه می‌دهد. محدودیت‌های تحقیق شامل عدم دسترسی به داده‌های رسمی پس از ۱۳۹۸ به‌دلیل توقف انتشار آمار جامع توسط مرکز آمار ایران، تمرکز بر کارگاه‌های ۱۰ نفر و بیشتر (حذف صنایع کوچک که بخش قابل توجهی از آلایندگی را دارند)، استفاده از مدل خروجی‌محور SBM که ممکن است در شرایط محدودیت ورودی نتایج متفاوتی ارائه دهد، و عدم در نظر گرفتن عوامل کیفی مانند نوع فناوری یا مدیریت پسماند است.

نتایج این تحقیق با مطالعات بین‌المللی هم‌خوانی نسبی اما معناداری دارد. یان و همکاران (۲۰۲۳) در چین کاهش ۱۲ درصدی اسلک پسماند را با اجرای مالیات زیست‌محیطی گزارش کردند، در حالی که در ایران اسلک پسماند ۰/۲۷۱ است و سیاست مالیاتی مشابهی به‌صورت مؤثر اجرا نشده است. ژائو و همکاران (۲۰۲۱) بهبود قابل توجه بهره‌وری را به تغییر فناوری نسبت دادند، اما در ایران TC منفی (۲/۷–٪) است که نشان‌دهنده محدودیت‌های انتقال فناوری سبز، از جمله ناشی از تحریم‌ها، می‌باشد. شاریف و همکاران (۲۰۲۳) سرمایه‌گذاری

سبز را عامل کاهش اسلک دانستند، اما در ایران سرمایه‌گذاری در این حوزه محدود بوده و اسلک انرژی همچنان بالا (۰/۳۴۲) است؛ بخش مهمی از این اسلک انرژی می‌تواند ناشی از قیمت‌گذاری دستوری و یارانه‌ای حامل‌های انرژی باشد که سیگنال‌های قیمتی نادرست ایجاد کرده و مصرف غیربهینه را تشویق می‌کند. پنگ و دیگران (۲۰۲۳) اثر مثبت مالیات بر کارایی سبز را تأیید کردند، اما در ایران اجرای مؤثر سیاست‌های مالیاتی سبز محدود بوده است. مغایرت اصلی با شن و ژانگ (۲۰۲۲) است که کاهش ۱۵ درصدی اسلک انرژی را با مالیات محیطی گزارش کردند، در حالی که در ایران اسلک انرژی بالا باقی مانده و سیاست مشابهی وجود ندارد.

تفاوت نتایج این تحقیق با مطالعات قبلی عمدتاً ناشی از شرایط خاص اقتصاد ایران است: تحریم‌های بین‌المللی، نوسانات شدید ارزی، افزایش قیمت حامل‌های انرژی و عدم اجرای سیاست‌های مالیاتی سبز، مانع بهبود TC و EC شده است. در مقابل، مطالعات خارجی در اقتصادهای باز با بازارهای رقابتی، دسترسی به فناوری و سیاست‌های تشویقی انجام شده‌اند. همچنین، استفاده از مدل SBM با خروجی‌های نامطلوب واقعی (WST، WWT) دقت بیشتری نسبت به مدل‌های پایه DEA در تحقیقات داخلی (مانند رضایی و همکاران، ۱۴۰۳ که خروجی نامطلوب نداشتند) فراهم کرده است. داریوند و همکاران (۱۴۰۳) اسلک پسماند را در صنایع غذایی بررسی کردند اما تحلیل پویا نداشتند، در حالی که این تحقیق با MQI روند نزولی را نشان داد.

از منظر کاربردی، نتایج تحقیق قابلیت تعمیم‌پذیری به کل بخش صنعت ایران را دارد و می‌تواند مبنای تدوین شاخص ملی کارایی سبز قرار گیرد. سیاست‌گذاران می‌توانند از رتبه‌بندی ۲۴ فعالیت (جدول ۶) برای اولویت‌بندی یارانه‌ها، معافیت‌های مالیاتی یا الزامات زیست‌محیطی استفاده کنند؛ برای مثال، در صنایع سنگین مانند فلزات اساسی و کک و فرآورده‌های نفتی (با اسلک انرژی بالای ۰/۴۰۰) وزارت صنعت، معدن و تجارت در کوتاه‌مدت (۱–۲ سال) ممیزی انرژی سالانه را الزامی کند و برنامه‌های کاهش مصرف با اهداف کمی همراه با مشوق‌های مالیاتی اجرا نماید، در حالی که در صنایع سبک مانند غذایی و نساجی (با اسلک انرژی زیر ۰/۲۲۰) الگوبرداری از بهترین عملکردها با پاداش تخفیف عوارض زیست‌محیطی پیگیری شود. مدیران صنعتی نیز می‌توانند از اسلک‌های محاسبه‌شده برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین، کاهش هزینه‌های انرژی و ارتقای رقابت‌پذیری در بازارهای صادراتی بهره ببرند. این نتایج همچنین برای سازمان حفاظت محیط زیست مبنای تنظیم استانداردهای آلایندگی تفکیکی و برای وزارت صنعت مبنای برنامه‌ریزی صنعتی پایدار است.

برای ادامه این تحقیق یا تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود دوره زمانی با استفاده از داده‌های غیررسمی، تخمینی یا گزارش‌های بنگاهی پس از ۱۳۹۸ گسترش یابد تا تأثیر سیاست‌های جدید مانند قانون مالیات بر آلاینده‌ها یا یارانه‌های انرژی سبز بررسی شود. مدل SBM خروجی‌محور ذاتاً ایستا و تک‌مرحله‌ای است و فرآیندهای شبکه‌ای یا چندمرحله‌ای تولید را لحاظ نمی‌کند، همچنین خروجی‌های نامطلوب محدود به پسماند و فاضلاب بوده و آلاینده‌های گازی را پوشش نمی‌دهد؛ بنابراین تعمیم به مدل‌های شبکه‌ای یا چندمرحله‌ای DEA، افزودن خروجی‌های نامطلوب بیشتر (مانند گازهای گلخانه‌ای) یا کاربرد DEA stochastic برای مدیریت عدم قطعیت توصیه می‌شود. ترکیب مدل SBM خروجی‌محور با نسخه ورودی‌محور می‌تواند نتایج مقاوم‌تری ارائه دهد و تفاوت دیدگاه‌های مدیریتی را نشان دهد؛ بررسی اثر سیاست‌های مالیاتی سبز با داده‌های پس از اجرای کامل قانون مالیات بر ارزش افزوده زیست‌محیطی، امکان تحلیل علیت را فراهم می‌کند؛ تحلیل منطقه‌ای کارایی سبز در استان‌های صنعتی مانند اصفهان، خوزستان یا تهران می‌تواند تفاوت‌های جغرافیایی، دسترسی به زیرساخت و شدت آلایندگی را آشکار سازد؛ در نهایت، ادغام متغیرهای کیفی مانند نوع فناوری، سطح مدیریت پسماند یا گواهینامه‌های ISO ۱۴۰۰۱ در مدل DEAمی‌تواند دقت پیش‌بینی و توصیه‌های سیاستی را افزایش دهد.

در مجموع، این تحقیق برای اولین بار در ایران با تلفیق مدل SBM و شاخص مالمکوئیست، کارایی سبز ۰/۶۸۳، اسلک انرژی ۰،۳۴۲ و کاهش سالانه ۴/۲ درصدی بهره‌وری سبز را با تمرکز بر عقب‌ماندگی فنی نشان داد. این یافته‌ها چارچوبی جامع برای پایش سالانه عملکرد زیست‌محیطی صنایع ارائه می‌دهد و به علم اقتصاد صنعتی ایران شاخص پویای کارایی سبز را اضافه می‌کند که می‌تواند مبنای طراحی مشوق‌های مالیاتی هدفمند، یارانه‌های فناوری سبز و استانداردهای آلایندگی تفکیکی باشد و رقابت‌پذیری و پایداری بلندمدت بخش صنعت را تقویت کند.

**ملاحظات پایانی مقاله**

- تعارض منافع: نویسندگان تصریح می‌کنند که در فرآیند انجام این پژوهش و انتشار مقاله، هیچ‌گونه تعارض منافعی (اعم از مالی، سازمانی و غیرمالی) با اشخاص حقیقی و حقوقی ندارند.
- در دسترس بودن داده‌ها: مجموعه داده‌های استفاده‌شده و کدهای محاسباتی این پژوهش، در صورت درخواست از سوی هیئت تحریریه نشریه، توسط نویسنده مسئول به صورت کامل در اختیار قرار خواهد گرفت.
- تعامل نویسندگان: نویسنده اول در مفهوم‌سازی، جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل مدل نقش داشته و نویسنده بعدی در نگارش ساختار اصلی، ویرایش نهایی و اعتبارسنجی نتایج مشارکت داشته است. (همه نویسندگان نسخه نهایی را مطالعه و تأیید کرده‌اند).
- منبع استخراج مقاله: این مقاله مستخرج از رساله دکتری با عنوان تاثیر شوک مالیاتی بر عملکرد سبز بخش صنعت » در دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزکوه می‌باشد.
- شفاف‌سازی (استفاده از هوش مصنوعی): در فرآیند تدوین این مقاله، از فناوری هوش مصنوعی صرفاً جهت [ویرایش نگارشی / ترجمه متون / بهبود ساختار جملات] استفاده شده است و مسئولیت کامل محتوای علمی و صحت داده‌ها بر عهده نویسندگان است.

**منابع**


- Ahmadi, M., & Colleagues. (2022). Energy efficiency analysis in Iranian industries using DEA method. *Quarterly Journal of Sustainable Economy and Development*, 2(4), 123–142. (In Persian)
- 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
- 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
- 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, Article 106408. https://doi.org/10،1016/j.eneco.2022،106408
- Chen, Y., & Golley, J. (2021). Green productivity growth in China's industrial economy. *Energy Economics*, 95, Article 105094. https://doi.org/10،1016/j.eneco.2021،105094
- Darivand, H., & Colleagues. (2024). Environmental efficiency analysis of Iran's food industries using DEA-BCC model. *Industrial Management Journal*, 15(2), 45–67. (In Persian)
- 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.
- Guo, D., Wang, Y., & Zhou, P. (2018). Measuring green productivity growth: A global Malmquist-Luenberger index approach. *Energy Economics*, 72, 144–152. https://doi.org/10،1016/j.eneco.2018،03،026
- Han, N., Li, F., Long, J., Liu, J., & Li, Q. (2022). Green innovation and enterprise sustainable development performance based on the SBM-DEA model. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022, Article 3127899. https://doi.org/10،1155/2022/3127899
- Khodadadi, A., & Colleagues. (2015). Economic efficiency of Iranian industries using DEA. *Journal of Industrial Economics Research*, 8(3), 112–130. (In Persian)
- Korani, A. & Falahatii A. (2024). Cost Efficiency Assessment of

Electricity Distribution Companies in Western Iran (Stochastic Frontier Analysis Approach). Industrial Economics Researches, 8(30), 1-14. (In Persian)
(DOI: 0.30473/jier.2025.74468.1495)

- Li, Z., Zhang, B., & Chen, J. (2022). Industrial green productivity under environmental regulation. *Journal of Cleaner Production*, 370, Article 133142. https://doi.org/10،1016/j.jclepro.2022،133142
- Liu, J., & Wang, K. (2021). Green total factor productivity and efficiency assessment based on DEA-SBM model. *Sustainability*, 13(5), Article 2669. https://doi.org/10،3390/su13052669
- Liu, J., & Yu, M. (2024). Analysis of green productivity in manufacturing based on different air pollution levels. *Scientific Reports*, 14, Article 23817. https://doi.org/10،1038/s41598-024-74845-z
- Liu, Y., & Colleagues. (2022). Dynamic green efficiency assessment in manufacturing industries. *Journal of Cleaner Production*, 342, Article 130987. https://doi.org/10،1016/j.jclepro.2022،130987
- Peng, M., Wei, C., Jin, Y., & Ran, H. (2023). Does the environmental tax reform positively impact corporate environmental performance? *Sustainability*, 15(10), Article 8023. https://doi.org/10،3390/su15108023
- Rahimi, A., & Colleagues. (2021). Energy efficiency measurement in Iran's metal industries using DEA. *Iran Energy Quarterly*, 9(37), 56–78. (In Persian)
- Rezaei, M., & Colleagues. (2024). Energy efficiency in Iran's petrochemical industries using DEA-CCR approach. *Journal of Industrial Economics Research*, 12(45), 89–110. (In Persian)
- Sharif, A., Kocak, S., Khan, H. H. A., Uzuner, G., & Tiwari, S. (2023). Demystifying the links between green technology innovation, economic growth, and environmental tax in ASEAN-6 countries: The dynamic role of green energy and green investment. *Gondwana Research*, 115, 98–106. https://doi.org/10،1016/j.gr.2022،11،012
- Shen, Y., & Zhang, X. (2022). Study on the impact of environmental tax on industrial green transformation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), Article 16749. https://doi.org/10،3390/ijerph192416749
- Simar, L., & Wilson, P. W. (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44(1), 49–61. https://doi.org/10،1287/mnsc.44،1،49
- Sueyoshi, T., & Goto, M. (2019). The intermediate approach to sustainability enhancement and scale-related measures in environmental assessment. *European Journal of Operational Research*, 276(2), 744–756. https://doi.org/10،1016/j.ejor.2019،01،030
- 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
- Yan, H., Qamruzzaman, M., & Kor, S. (2025). Nexus between green investment, fiscal policy, environmental tax, energy price, natural resources, and clean energy—A step towards sustainable development by fostering clean energy inclusion. *Sustainability*, 15(18), Article 13591. https://doi.org/10،3390/su151813591

- Zhang, B., & Colleagues. (2020). Green efficiency evaluation of manufacturing industries based on SBM model. *Journal of Cleaner Production*, 268, Article 122189. https://doi.org/10،1016/j.jclepro.2020، 122189
- Zhang, B., & Colleagues. (2023). Dynamic evaluation of industrial green productivity. *Ecological Indicators*, 145, Article 109712. https://doi.org/10،1016/j.ecolind.2022 ،109712
- Zhao, L., Zhang, Y., Sadiq, M., Hieu, V. M., & Ngo, T. Q. (2025). Testing green fiscal policies for green investment, innovation and green productivity amid the COVID-19 era. *Economic Change and Restructuring*, 56(5), 2943–2964. https://doi.org/10،1007/s10644-023-09515-7
- Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2018). Measuring environmental performance under different DEA models. *European Journal of Operational Research*, 269(2), 401–415. https://doi.org/10،1016/j.ejor.2017،08 ،022
- Zhou, X., Li, J., & Sun, T. (2023). Dynamic analysis of green productivity in manufacturing industries. *Ecological Indicators*, 155, 110–125.