THE JOURNAL OF MACRO AND STRATEGIC POLICIES

Institute for Strategic Research

Research Paper

Macro and Strategic Policies | Year 2026 | Vol. 14 | Iss. 55 | Pages: 455–473

Monitoring the strategic environmental policies in the petrochemical industry in line with the realization of the general policies of energy and resistance economy

Samaneh Abedi[1*], Fatemeh Naeimi[2]

1.Associate Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.*
2.PhD Candidate, Faculty of Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 23 May 2026

Revised: 8 July 2026

Accepted: 10 August 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Eco-Efficiency, Green Competitiveness, Slack-Based Measure Model, Undesirable Outputs, Petrochemical Industry, General Environmental Policies.

ABSTRACT

The petrochemical industry plays a key role in Iran's non-oil economy, yet it is also one of the major sources of greenhouse gas emissions. Assessing its environmental efficiency is strategically important for achieving the General Policies on the Environment, Energy, and the Resistance Economy, as well as for enhancing green competitiveness. This study evaluates the environmental efficiency and green competitiveness of ten major listed petrochemical companies in Iran during the period 2021–2025 using a non-oriented Slacks-Based Measure (SBM) model with undesirable outputs. Inputs include fixed assets, labor, and feedstock/energy costs, while the desirable output is operating revenue, and CO_2 emissions are treated as the undesirable output. The results show that the average environmental efficiency of the sample is 0.926, indicating a potential improvement of approximately 7.4%. Amir Kabir achieved full efficiency throughout the entire period and demonstrated the highest level of green competitiveness, whereas Jam and Nouri recorded the lowest scores. Inefficiency is mainly driven by excessive feedstock and energy consumption as well as higher CO_2 emissions. The findings can serve as a practical tool for monitoring the implementation of strategic policies and designing incentive mechanisms to improve the green performance of Iran's petrochemical industry.

* Corresponding author: Samaneh Abedi. Email: s.abedi@atu.ac.ir

Citation: abedi, S. & Naeimi, F. (2026). Monitoring the strategic environmental policies in the petrochemical industry in line with the realization of the general policies of energy and resistance economy. Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies, 14(55), 455–473. https://doi.org/10.30507/jmsp.2026.597268.2938

Extended Abstract

Introduction

The petrochemical industry plays a strategic role in Iran's non-oil economy through its contribution to GDP, non-oil exports, foreign exchange earnings, and employment. At the same time, due to the nature of its production processes, it is one of the major sources of greenhouse gas emissions in the country. Evaluating the environmental efficiency of this industry is therefore essential from the perspective of the General Policies on the Environment (2015), the General Policies on Energy, and the General Policies of the Resistance Economy, particularly those emphasizing productivity growth and reduction of energy intensity. In recent years, the concept of green competitiveness has emerged as an integrated framework that simultaneously considers economic performance and environmental outcomes. Environmental efficiency can be regarded as a key operational indicator of green competitiveness. Despite the economic importance of the petrochemical sector and growing environmental concerns, rigorous quantitative assessments of environmental efficiency using advanced Data Envelopment Analysis models remain limited. This study aims to evaluate the environmental efficiency and green competitiveness of ten major listed petrochemical companies in Iran over the period 2021–2025 using a non-oriented Slacks-Based Measure (SBM) model with undesirable outputs.

Methodology

This applied research adopts a quantitative approach. The non-oriented SBM model with undesirable outputs is employed to measure environmental efficiency. The Decision-Making Units (DMUs) consist of ten major listed petrochemical companies: Persian Gulf, Nouri, Pardis, Jam, Pars, Bu-Ali Sina, Tondgooyan, Khark, Marun, and Amir Kabir. Inputs include fixed assets, labor, and feedstock/energy costs, while the desirable output is operating revenue, and CO_2 emissions are treated as the undesirable output. CO_2 emissions are estimated using product-specific emission factors based on IPCC guidelines. The model is solved using MaxDEA software. The resulting efficiency scores are interpreted as quantitative indicators of green competitiveness and as a tool for monitoring progress toward the aforementioned strategic policies.

Results and Discussion

The average environmental efficiency of the sample is 0.926, indicating a potential improvement of approximately 7.4 percent in the overall performance of the studied companies. Amir Kabir achieved full efficiency (score = 1) throughout the entire period and serves as the leading benchmark with the highest level of green competitiveness. In contrast, Jam and Nouri recorded the lowest efficiency scores. Slack analysis reveals that inefficiency is mainly driven by excessive feedstock and energy consumption as well as higher CO_2 emissions relative to economic outputs. Interestingly, the dominant product type alone does not consistently explain differences in efficiency; for instance, methanol production (with the highest estimated emission coefficient) does not necessarily correspond to lower efficiency, while some aromatic-based producers rank among the lowest performers. This suggests that operational scale, cost management, and the ability to generate economic value per unit of pollution play a more decisive role than product type alone in shaping green competitiveness within the industry.

Conclusion

While some leading petrochemical companies in Iran operate at the efficiency frontier, considerable room remains for improving the environmental performance and green competitiveness of the sector as a whole. The results can serve as a practical instrument for monitoring the implementation of the General Policies on the Environment, Energy, and the Resistance Economy. Policymakers are advised to promote technology transfer from benchmark firms, design performance-based incentive mechanisms, direct investment toward cleaner production technologies, and strengthen ESG reporting requirements for listed companies. Enhancing environmental efficiency will not only reduce pollution but also strengthen the long-term sustainability, resilience, and international competitiveness of Iran's strategic petrochemical industry.

Keywords: Eco-Efficiency, Green Competitiveness, Slack-Based Measure Model, Undesirable Outputs, Petrochemical Industry, General Environmental Policies.

فصلنامه علمی
سیاست‌های راهبردی و کلان
پژوهشکده تحقیقات راهبردی

مقاله پژوهشی

سیاست‌های راهبردی و کلان | سال ۱۴۰۵ | دوره ۱۴ | شماره ۵۵ | صفحات: ۴۵۵-۴۷۳

پایش سیاست‌های راهبردی محیط‌زیست در صنعت پتروشیمی در راستای تحقق سیاست‌های کلی انرژی و اقتصاد مقاومتی

سمانه عابدی*[۱]، فاطمه نعیمی[۲]

۱*. دانشیاردانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۲. دانشجو دکتری دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

سابقه مقاله:
تاریخ دریافت: ۲ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ بازنگری: ۱۷ تیر ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۴۰۵
تاریخ انتشار: ۱ مهر ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:
کارایی اکولوژیک، رقابت‌پذیری سبز، مدل سنجش مبتنی بر مازادها، صنعت پتروشیمی، سیاست‌های کلی محیط زیست.

چکیده

صنعت پتروشیمی به‌عنوان یکی از ارکان زنجیره ارزش نفت و گاز، نقش مهمی در اقتصاد غیرنفتی ایران ایفا می‌کند، اما همزمان از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود. ارزیابی کارایی زیست‌محیطی این صنعت از منظر تحقق سیاست‌های کلی محیط زیست، انرژی و اقتصاد مقاومتی و همچنین ارتقای رقابت‌پذیری سبز اهمیت راهبردی دارد. این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی زیست‌محیطی و رقابت‌پذیری سبز ده شرکت بزرگ پتروشیمی بورسی ایران طی دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴ انجام شده است. برای این منظور از مدل غیرجهت‌دار سنجش مبتنی بر مازادها (SBM) با در نظر گرفتن خروجی نامطلوب (انتشار دی‌اکسید کربن) استفاده شد. ورودی‌ها شامل سرمایه ثابت، نیروی کار و هزینه خوراک(انرژی) و خروجی مطلوب درآمد عملیاتی بوده است. نتایج نشان می‌دهد میانگین کارایی زیست‌محیطی نمونه برابر با ۹۲۶/۰ است که بیانگر پتانسیل بهبود حدود ۴/۷ درصدی می‌باشد. شرکت امیرکبیر در تمام دوره مورد بررسی بر روی مرز کارایی قرار داشته و از بالاترین سطح کارایی زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از ارکان رقابت‌پذیری سبز، برخوردار بوده است. در مقابل، شرکت‌های جم و نوری پایین‌ترین کارایی را ثبت کرده‌اند. ناکارایی عمدتاً ناشی از مصرف بالای خوراک و انرژی و انتشار بالاتر دی‌اکسید کربن بوده و نوع محصول غالب نیز بر سطح کارایی تأثیرگذار است. یافته‌های پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پایش تحقق سیاست‌های کلی و طراحی سازوکارهای تشویقی در جهت ارتقای عملکرد سبز صنعت پتروشیمی مورد استفاده قرار گیرد.

* نویسنده مسئول: سمانه عابدی. ایمیل: s.abedi@atu.ac.ir

استناد: عابدی، سمانه و نعیمی، فاطمه. (۱۴۰۵). پایش سیاست‌های راهبردی محیط‌زیست در صنعت پتروشیمی در راستای تحقق سیاست‌های کلی انرژی و اقتصاد مقاومتی. سیاست‌های راهبردی و کلان، ۱۴(۵۵)، ۴۵۵-۴۷۳.
https://doi.org/۱۰.۳۰۵۰۷/jmsp.۲۹۳۸.۵۹۷۲۶۸.۲۰۲۶

مقدمه

صنعت پتروشیمی، به‌عنوان حلقه‌ای میانی و ارزش‌آفرین در زنجیره نفت و گاز، در اقتصاد ایران جایگاهی فراتر از یک بخش صنعتی منفرد دارد. این صنعت با تبدیل خوراک‌های هیدروکربنی به طیفی از محصولات میانی و نهایی با ارزش افزوده بالاتر، مسیر کاهش خام‌فروشی و تعمیق زنجیره ارزش را تقویت می‌کند؛ مسیری که در ادبیات توسعه صنعتی، یکی از کانال‌های اصلی ارتقای بهره‌وری، ایجاد اشتغال و تقویت ظرفیت صادراتی کشورها شناخته می‌شود (۱۲، ۳۲). از منظر کلان‌اقتصادی، اهمیت پتروشیمی برای ایران عمدتاً از دو مسیر حائز اهمیت است؛ نخست، سهم آن در صادرات غیرنفتی و ارزآوری به‌ویژه در دوره‌هایی که اقتصاد با محدودیت‌های تجاری و مالی مواجه است و دوم، پیوندهای پسین و پیشین گسترده با صنایع پایین‌دستی که موجب انتشار آثار تولید و اشتغال در بخش‌های متعدد می‌شود (۳۱، ۳۴).

تنوع محصولات پتروشیمی از پلیمرها و مواد پایه شیمیایی تا نهاده‌های تخصصی، به این صنعت امکان می‌دهد به‌عنوان تأمین‌کننده نهاده‌های کلیدی برای صنایعی مانند پلاستیک و بسته‌بندی، نساجی، داروسازی و حتی کشاورزی (مخصوصا در تولید کودها و مواد شیمیایی مرتبط)، عمل کند. چنین نقش تأمین‌کنندگی، به معنای شکل‌گیری یک شبکه وابستگی متقابل است که در آن، پایداری عرضه، کیفیت و رقابت‌پذیری محصولات پتروشیمی می‌تواند به‌طور مستقیم بر عملکرد و تاب‌آوری بخش‌های پایین‌دستی اثر بگذارد (۳۲، ۲۵). از این رو، سیاست‌گذاری در حوزه پتروشیمی صرفاً سیاست صنعتی نیست، بلکه بخشی از راهبرد توسعه تولید ملی و ارتقای توان رقابتی اقتصاد در بازارهای منطقه‌ای و جهانی به شمار می‌آید. این موضوع زمانی اهمیت می‌یابد که هدف، حرکت از صادرات مواد خام و نیمه‌خام به سمت صادرات محصولات پیچیده‌تر و دانش‌برتر باشد (۱۲، ۳۱).

در سطح اسناد بالادستی طبق سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ نیز، به توسعه صنایع پایین‌دستی و تکمیل زنجیره ارزش به‌عنوان یکی از مسیرهای اصلی تقویت اقتصاد غیرنفتی و اشتغال‌زایی تأکید شده است. لذا در چارچوب اهداف آن در حوزه اقتصاد غیرنفتی، صنعت پتروشیمی می‌تواند مشروط به ارتقای فناوری، بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه پیوندهای صنعتی، به‌عنوان یکی از پیشران‌های تحقق اهداف توسعه صنعتی و افزایش سهم صادرات غیرنفتی ایفای نقش کند.

با این حال، با وجود این پیشران‌های اقتصادی، توسعه پرشتاب صنعت پتروشیمی با هزینه‌های زیست‌محیطی چشمگیری همراه است. فرآیندهای پرانرژی و ماهیت شیمیایی تولید در این بخش، آن را به یکی از کانون‌های اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های جوی در ایران تبدیل کرده است (۲۲). شواهد تجربی نشان می‌دهند که انتشار گاز دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های پتروشیمی کشور در سال ۲۰۲۰ به مرز ۳۵ میلیون تن رسیده و برآوردها حاکی از صعود نگران‌کننده این رقم به بیش از ۱۱۳ میلیون تن تا سال ۲۰۳۵ است (۲۲). این روند فزاینده، نه تنها تعهدات ملی را در مواجهه با بحران‌های اقلیمی با چالش مواجه می‌سازد، بلکه به طور مستقیم بر تشدید آلودگی‌های موضعی و تنزل کیفیت هوای کلان‌شهرهای صنعتی مجاور دامن می‌زند (۳۴).

در این چارچوب، سنجش کارایی اکولوژیک صنعت پتروشیمی از منظر سیاست‌های راهبردی کشور اهمیت ویژه‌ای دارد. اسناد بالادستی ایران، از جمله سیاست‌های کلی محیط زیست (ابلاغی ۱۳۹۴)، بر مدیریت یکپارچه منابع حیاتی و هوا تأکید دارند؛ در حالی که سیاست‌های کلی انرژی، بهینه‌سازی مصرف و تکمیل زنجیره ارزش را هدف قرار داده‌اند. هم‌زمان، بندهای ۳ و ۴ سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی (ابلاغی ۱۳۹۲)، رشد بهره‌وری، رقابت‌پذیری اقتصاد و کاهش شدت انرژی را به عنوان ارکان تاب‌آوری ملی معرفی می‌کنند. در نتیجه، ارزیابی کمی کارایی اکولوژیک شرکت‌های پتروشیمی ابزاری کلیدی برای پایش میزان تحقق این اهداف و سنجش فاصله میان وضعیت موجود و اهداف کلان توسعه است (۲۱). در ادامه این پژوهش، یافته‌های کمّی حاصل از مدل SBM به‌طور مصداقی با شاخص‌ها و اهداف مندرج در این اسناد بالادستی (از جمله کاهش شدت انرژی، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و رشد بهره‌وری) تطبیق داده می‌شود تا فاصله میان وضعیت موجود صنعت پتروشیمی و وضعیت مطلوب موردنظر این سیاست‌ها به‌صورت کمی مشخص گردد.

در این زمینه، مفهوم رقابت‌پذیری سبز[1] به عنوان نقطه تلاقی عملکرد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی در کانون توجه قرار گرفته است. رقابت‌پذیری سبز صرفاً یک رویکرد واکنشی برای کاهش آلاینده‌ها نیست، بلکه فرآیندی پویا است که از مجرای نوآوری سبز، کاهش ردپای کربن و بهینه‌سازی منابع، به خلق مزیت رقابتی پایدار می‌انجامد (۶). در صنایع انرژی‌بر مانند پتروشیمی، ارتقای کارایی اکولوژیک به عنوان پیش‌شرط این رقابت‌پذیری عمل کرده و سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا ضمن حفظ سودآوری، به الزامات گذار به اقتصاد کم‌کربن در بازارهای جهانی پاسخ دهند (۳۷). لازم به تصریح است که در این پژوهش، کارایی اکولوژیک[2] به‌عنوان یک شاخص عملیاتی و قابل‌سنجش کمی از رقابت‌پذیری سبز به‌کار گرفته می‌شود، نه معادل کامل مفهومی آن. رقابت‌پذیری سبز مفهومی گسترده‌تر است که علاوه‌بر کارایی تخصیص منابع و کنترل آلایندگی، ابعادی مانند نوآوری سبز، جایگاه‌یابی در بازارهای بین‌المللی و توان پایدار رقابتی را نیز دربرمی‌گیرد (۶). با این حال، ازآنجاکه کارایی زیست‌محیطی یکی از ارکان کلیدی و قابل‌اندازه‌گیری رقابت‌پذیری سبز در صنایع انرژی‌بر محسوب می‌شود (۳۷)، در این پژوهش امتیاز کارایی حاصل از مدل SBM به‌عنوان یک شاخص تقریبی از رقابت‌پذیری سبز شرکت‌ها تفسیر می‌شود.

بنابراین با وجود اهمیت راهبردی پتروشیمی در ایران و ضرورت‌های جهانی کاهش انتشار کربن، ادبیات پژوهش در این حوزه با چالش‌هایی مواجه است.

1. Green Competitiveness
2. Ecological Efficiency

بخش عمده‌ای از مطالعات گذشته یا به کارایی اقتصادی و فنی محض پرداخته‌اند یا تحلیل‌های زیست‌محیطی را بدون مدل‌سازی یکپارچه با عملکرد مالی انجام داده‌اند. این شکاف پژوهشی و عدم به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته خروجی‌محور مانند مدل سنجش مبتنی بر مازادها[3] (SBM)، مانع از رتبه‌بندی دقیق شرکت‌های پیشرو و شناسایی پتانسیل‌های واقعی بهبود در حوزه کارایی اکولوژیک صنعت پتروشیمی شده است. لذا هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کارایی اکولوژیک و رقابت‌پذیری سبز ده شرکت بزرگ پتروشیمی بورسی ایران طی دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴ با استفاده از مدل سنجش مبتنی بر مازادها و در نظر گرفتن خروجی نامطلوب است. در این چارچوب، پژوهش حاضر می‌کوشد شرکت‌های کارا و ناکارا را شناسایی کرده، واحدهای مرجع صنعت را تعیین کند، و منابع اصلی ناکارایی از جمله مازاد مصرف خوراک و انرژی و نیز انتشار دی‌اکسید کربن را مورد تحلیل قرار دهد. افزون بر این، مطالعه حاضر اثر نوع محصول غالب بر سطح کارایی اکولوژیک و رقابت‌پذیری سبز شرکت‌ها را بررسی کرده و در نهایت، پیشنهادهایی سیاستی در راستای تحقق مؤثرتر سیاست‌های کلی محیط زیست، انرژی و اقتصاد مقاومتی ارائه می‌دهد.

۱. مبانی نظری و پیشینه تجربی

۱-۱. پیشینه پژوهش

۱-۱-۱ پیشینه داخلی

در پهنه مطالعات تجربی انرژی در ایران، امامی میبدی و جایدری (۱۳۹۳) با تمرکز بر ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی بخش پالایشگاهی، کارایی سبز پالایشگاه‌های نفت کشور را طی بازه زمانی ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ بررسی کردند. در این پژوهش با به‌کارگیری رویکرد ستانده‌محور تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و وارد نمودن خروجی‌های نامطلوب در نرم‌افزار WinDEAP، روند پویای کارایی واحدهای پالایشگاهی ترسیم گردید. یافته‌های این مطالعه ضمن معرفی پالایشگاه بندرعباس به عنوان واحد پیشرو (مرجع) در دوره مورد بررسی، نشان‌دهنده نرخ رشد مثبت کارایی سبز در کل صنعت پالایش است. از منظر تحلیل نهاده‌ها و ستانده‌ها، نتایج این پژوهش آشکار ساخت که مصرف سوخت‌های سنگین نظیر نفت کوره و نفت‌گاز اثر کاهنده شدیدی بر کارایی سبز دارد، در حالی که جایگزینی سوخت‌های پاک‌تر مانند گاز طبیعی و گاز مایع، بهبود معنادار شاخص‌های پایداری را به همراه دارد. علاوه بر این، یافته‌های آن‌ها نشان داد که بهره‌برداری بیش از ظرفیت اسمی پالایشگاه‌ها با تشدید انتشار آلاینده‌ها، به شکل معناداری به افت کارایی سبز منجر می‌شود؛ امری که ضرورت مدیریت بهینه ظرفیت و گذار به سبد سوخت کم‌کربن را در صنایع فرآورش نفت و گاز تأیید می‌کند (۷).

در مطالعه‌ای دیگر امامی میبدی و همکاران (۱۳۹۵) همچنین عملکرد پالایشگاه‌های گازی ایران را از منظر کارایی زیست‌محیطی طی دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۴ با به‌کارگیری مدل تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) و شاخص مالم‌کوئیست، مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد پالایشگاه‌های خانگیران (هاشمی‌نژاد) و پارسیان از میان ۱۲ پالایشگاه گاز طبیعی کشور، بالاترین سطح کارایی فنی_ زیست‌محیطی را دارا بوده‌اند. همچنین محاسبه شاخص بهره‌وری کل عوامل تولید بیانگر آن بود که نیمی از پالایشگاه‌ها رشد مثبت و نیمی دیگر رشد منفی بهره‌وری را تجربه کرده‌اند. نتایج مطالعه تأکید می‌کند که بهبود کارایی زیست‌محیطی در صنایع انرژی‌بر، مستلزم بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و کاهش همزمان خروجی‌های نامطلوب است (۸).

در راستای توسعه مدل‌های ارزیابی تحت شرایط عدم قطعیت، اوحدی و همکاران (۱۳۹۸) کارایی سبز کربن را در ایران و کشورهای منتخب صادرکننده نفت با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌های فازی[4] (FDEA) مورد سنجش قرار دادند. یافته‌های مرزی این پژوهش که با لحاظ نمودن داده‌های غیردقیق و نوسانی انجام شد، نشان داد که میانگین بازه کارایی کربن در کشورهای مورد مطالعه بین ۷۵ تا ۹۰ درصد نوسان دارد. در این میان، ارزیابی جایگاه ایران با کسب میانگین کارایی سبز کربن معادل ۶۱ درصد (کران پایین) و ۷۴ درصد (کران بالا)، نشان‌دهنده فاصله معنادار کشور از مرز کارایی و قرارگیری در موقعیت نامطلوب در مقایسه با سایر کشورهای نفتی است. تحلیل مسیرهای بهبود در این مطالعه تأکید می‌کند که ارتقای کارایی سبز کربن در اقتصادهای مبتنی بر منابع، مستلزم اصلاح تخصیص نهاده‌های تولید، بهینه‌سازی زنجیره مصرف انرژی و کاهش سیستماتیک شدت کربن در بخش‌های صنعتی است (۲۶).

یاوری و همکاران (۱۴۰۲) با بهره‌گیری از راهبرد کیفی و نظریه داده‌بنیاد، مدل بازاریابی سبز صنعت نفت ایران را مبتنی بر سیاست‌های کلی محیط‌زیست طراحی کردند. جامعه آماری این پژوهش مدیران شرکت‌های زیرمجموعه وزارت نفت و اساتید بازاریابی دانشگاه‌ها بودند و داده‌ها از طریق ۱۸ مصاحبه نیمه‌ساختاریافته تا رسیدن به اشباع نظری گردآوری و با روش کدگذاری اشتراوس و کوربین[5] تحلیل شدند. یافته‌های پژوهش نشان داد حمایت دولت از صنعت سبز، منابع انسانی سبز و مسئولیت اجتماعی شرکت به‌عنوان عوامل زیربنایی، و هوش هیجانی مدیران به‌عنوان عامل راهبردی در اجرای بازاریابی سبز نقش ایفا می‌کنند. همچنین ظرفیت‌های بالقوه رقابتی به‌عنوان عامل مداخله‌گر و فرهنگ شرکتی سبز به‌عنوان شرایط زمینه‌ای شناسایی شدند. نتایج حاکی

3. Slack-Based Measure Model
4. Fuzzy Data Envelopment Analysis
5. Strauss and Corbin coding

از آن است که اجرای این مدل می‌تواند به ارتقای طراحی، تولید و توزیع محصولات سبز، افزایش بهره‌وری و سودآوری شرکت و جلب رضایت مشتریان و ذی‌نفعان منجر شود (۳۵).

در سطح مطالعات تک‌شرکتی و متمرکز بر صنایع پتروشیمی ایران، موسوی و نادری‌زاده (۱۴۰۳) عملکرد سبز مجتمع پتروشیمی نوری را با استفاده از متغیرهای کلیدی تولید، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها در چارچوب روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش تفاوت‌های ساختاری بارزی را در سطح کارایی سبز واحدهای مختلف فرآیندی آشکار ساخت و واحدها را به دو گروه کارا (مرز پایداری با خروجی مطلوب بهینه) و ناکارا تفکیک نمود. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت در این مطالعه، دستیابی واحدهای ناکارا به مرز کارایی با اصلاحات جزئی در تخصیص منابع و بهینه‌سازی فرآیندها امکان‌پذیر است. نکته حائز اهمیت در این پژوهش، تأکید نویسندگان بر مزیت به‌کارگیری مدل سنجش مبتنی بر مازادها (SBM) با لحاظ نمودن خروجی‌های نامطلوب است؛ رویکردی که با شناسایی دقیق مازاد مصرف نهاده‌ها و گلوگاه‌های آلایندگی، ابزاری دقیق برای ارتقای پایداری و بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در این صنعت فراهم می‌آورد (۲۳).

در سطح تحلیل‌های کلان و پیوند تجارت با پایداری، ایزدی و پارسه (۱۴۰۳) به واکاوی اثرات زیست‌محیطی سبد محصولات صادراتی پتروشیمی ایران (شامل گوگرد، هیدروکربن‌ها، الکل‌ها، پارافین و قیر) طی بازه زمانی ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۹ پرداختند. یافته‌های این مطالعه که با بهره‌گیری از الگوی هم‌انباشتگی حداقل مربعات اصلاح‌شده کاملاً پویا[6] (FMOLS) حاصل شده است، نشان‌دهنده وجود یک رابطه مثبت و معنادار میان حجم صادرات پتروشیمی و شاخص‌های تخریب محیط‌زیست است. تحلیل مکانیزم اثر در این پژوهش تأکید می‌کند که مدل کنونی توسعه صادرات در این صنعت، به دلیل اتکا به فرآیندهای سنتی و انرژی‌بر، با تشدید مصرف نهاده‌های فسیلی و افزایش انتشار آلاینده‌ها همراه است. این یافته‌ها ضرورت بازنگری در ساختار تولید و گذار به سمت رقابت‌پذیری سبز را آشکار می‌سازد تا افزایش سهم بازار جهانی لزوماً به بهای فرسایش دارایی‌های سبز ملی تمام نشود (۱۷).

۲.۱-۱ پیشینه خارجی

حسینی و استفانیک (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به ارزیابی کارایی صنعت پالایش نفت ایران با در نظر گرفتن خروجی نامطلوب (مازوت) پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های دو مرحله‌ای پویا مبتنی بر مازادها (Dynamic Two-Stage SBM) و داده‌های مربوط به ۹ پالایشگاه عمده کشور طی دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ نشان داده‌اند که سطح کارایی کلی پالایشگاه‌ها در ایران پایین است (با میانگین حدود ۰/۵۶). نتایج این مطالعه بیانگر آن است که تولید بالای مازوت به‌عنوان خروجی نامطلوب، تأثیر منفی بسیار قوی بر کارایی کلی دارد و عدم وجود واحدهای تبدیل پیشرفته (مانند کراکینگ[7]) یکی از اصلی‌ترین علل ناکارآمدی صنعت پالایش ایران است (۱۴).

گنگ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم خوشه‌بندی به ارزیابی کارایی انرژی و پتانسیل صرفه‌جویی انرژی در صنایع پتروشیمی پرداخته‌اند. آن‌ها واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs) را خوشه‌بندی کرده‌اند و نشان داده‌اند که مدل پیشنهادی AP-DEA قابلیت تشخیص دقیق‌تر واحدهای کارآمد و ناکارآمد را دارد. نتایج بیانگر آن است که در واحدهای تولید اتیلن و اسید ترفتالیک خالص[9] (PTA)، پتانسیل صرفه‌جویی انرژی به ترتیب حدود ۰/۴۹ درصد و ۲۴/۷۴ درصد و کاهش انتشار کربن در فرآیند اتیلن حدود ۱٪۴ درصد برآورد شده است (۱۰).

لین و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه خود با استفاده از مدل سنجش مبتنی بر مازادها (SBM) با خروجی‌های نامطلوب به بررسی اثرات اقتصاد و انتشار دی‌اکسیدکربن بر ساختارهای انرژی جهان جهت تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی آن پرداخته‌اند. باتوجه به اینکه انتشار دی‌اکسیدکربن عمدتاً از سوزاندن انرژی‌های فسیلی مانند نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ ناشی می‌شود، در این روش مصرف نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ ورودی‌های مدل هستند و ارزش تولید ناخالص داخلی سرانه به عنوان خروجی مطلوب و انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان خروجی نامطلوب در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی کشورها و مناطق توسعه یافته بالاتر از کشورهای در حال توسعه است. علاوه بر این، به دلیل پیکربندی بهینه مازاد ورودی‌ها و خروجی نامطلوب، مقادیر کارایی برخی از کشورها و مناطق ناکارآمد می‌تواند تا حد زیادی بهبود یابد. همچنین نتایج بیانگر آن است که در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، میانگین کارایی در قاره اروپا و اقیانوسیه نسبتاً بالا بوده است و آسیا طی این دو سال کمترین مقدار میانگین کارایی را در میان پنج قاره دارا بوده است (۲۰).

مظفری و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای، مدل دومرحله‌ای تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای را در دو حالت جهت‌دار و شعاعی، در محیطی کاملاً فازی و با لحاظ خروجی‌های نامطلوب توسعه دادند تا تولید سبزتر و همراه با آلایندگی کمتر را در صنعت پتروشیمی ارزیابی کنند. نتایج این مطالعه نشان داد که

6. Fully Modified Ordinary Least Squares
7. Cracking

در پالایشگاه‌های ایران مازوت زیادی تولید می‌شود که ارزش پایینی دارد و آلاینده هست. واحد کراکینگ مولکول‌های سنگین نفت مثل مازوت و نفت کوره را به مولکول‌های سبک‌تر و پرارزش‌تر مانند بنزین، گازوئیل، نفت سفید می‌شکند.

9. Pure Terephthalic Acid

در نظر گرفتن عدم‌قطعیت داده‌ها و خروجی‌های نامطلوب، از جمله آلاینده‌ها، تأثیر قابل‌توجهی بر ارزیابی کارایی واحدهای پتروشیمی دارد. همچنین، مدل پیشنهادی ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیری در شرایط واقعی و همراه با ابهام در صنعت پتروشیمی فراهم می‌کند (۲۴).

هی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به ارزیابی اثرات عوامل مؤثر بر رقابت‌پذیری سبز صنعتی پرداختند. آن‌ها با ترکیب الگوریتم خوشه‌بندی فازی C-means، نظریه مجموعه راف[10] و شبکه عصبی مصنوعی فازی[11] (FANN)، مدلی ترکیبی برای تحلیل روابط پیچیده میان عوامل مختلف و رقابت‌پذیری سبز صنایع طراحی کردند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که شدت تحقیق و توسعه، مقررات زیست‌محیطی و مقیاس بنگاه، سه عامل اصلی و تأثیرگذار بر رقابت‌پذیری سبز صنعتی هستند (۱۳).

بازرگان و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به تحلیل فنی صنعت پتروشیمی ایران با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای (Network DEA) پرداخته‌اند. آن‌ها با طراحی یک مدل شبکه‌ای متناسب با ساختار زنجیره تأمین شرکت‌های پتروشیمی و شناسایی شاخص‌های ورودی، خروجی و میانی از طریق مطالعات میدانی، کارشناسی و بازدیدهای میدانی، کارایی تجمعی و کارایی اجزای مختلف زنجیره را طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ ارزیابی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل شبکه‌ای DEA امکان بررسی دقیق‌تر ساختار داخلی واحدها را فراهم می‌کند و مدیران را قادر می‌سازد نقاط ضعف هر بخش از زنجیره تأمین را شناسایی و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک بهتری برای بهبود عملکرد کلی صنعت اتخاذ کنند (۲).

مدیرزاده و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای، ظرفیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت پتروشیمی ایران را از طریق بهبود بهره‌وری انرژی بررسی کردند. آنان با استفاده از مدل LEAP[12] و تدوین سناریوهای مختلف صرفه‌جویی انرژی در مجتمع‌های موجود و برنامه‌ریزی‌شده نشان دادند که با سرمایه‌گذاری حدود ۱۶۰ میلیون دلار در پروژه‌های ارتقای کارایی انرژی، به‌ویژه طرح‌های کاهش مصرف بخار و گاز طبیعی، می‌توان تا سال ۲۰۳۰ انتشار گازهای گلخانه‌ای این صنعت را حدود ۷/۶ درصد کاهش داد. نتایج همچنین نشان داد که اجرای این پروژه‌ها از توجیه اقتصادی برخوردار است و ارزش خالص فعلی آن‌ها حدود ۲ میلیارد دلار برآورد می‌شود (۲۲).

آلجیری و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای شاخص رقابت‌پذیری نوآوری سبز[13] را معرفی کرده‌اند. آن‌ها با تمرکز بر داده‌های مربوط به پتنت‌های سبز، شاخصی کمی برای سنجش رقابت‌پذیری مبتنی بر نوآوری‌های زیست‌محیطی پیشنهاد کردند. شاخص پیشنهادی می‌تواند برای توسعه تحلیل‌های تجربی بین‌کشوری و طراحی سیاست‌های کارآمد مفید واقع شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رقابت‌پذیری سبز تأثیری مثبتی بر حجم صادرات دارد و شاخص پیشنهادی قابلیت مقایسه بین‌کشوری و بین‌صنعتی را داراست و می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی جایگاه کشورها و صنایع در زمینه نوآوری سبز و رقابت‌پذیری پایدار باشد (۱).

وانگ و فن (۲۰۲۵) در بستر گذار جهانی به بی‌طرفی کربنی، به بررسی پیامدهای فشارهای فزاینده مقررات زیست‌محیطی بر پایداری شرکت‌های نفت و گاز پرداختند. آنان با ارائه یک مدل محاسباتی جامع، آثار تحول کم‌کربن و مسیر توسعه شرکت‌های پتروشیمی/نفتی را در سال‌های اخیر ارزیابی کردند؛ نوآوری مهم این مطالعه، وارد کردن ردپای کربنی Scope ۳ در کنار سایر ابعاد انتشار در مدل ارزیابی است؛ امری که نتایج را به واقعیت عملکرد شرکت‌ها نزدیک‌تر و از منظر سیاستی آینده‌نگرتر می‌سازد. این مدل بر روی ۳۲ شرکت بین‌المللی فعال در تولید و پالایش نفت و گاز اعمال شد و نتایج نشان داد که محل استقرار شرکت‌ها، نوع فعالیت و جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش، الگوهای متفاوتی از کارایی را رقم می‌زند. در مجموع، یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که صنعت پتروشیمی/نفت و گاز به‌طور فعال در مسیر توسعه کم‌کربن حرکت کرده است؛ با این حال، هم‌زمان با گسترش محصولات پتروشیمی، بخش پالایش نیازمند توجه و نظارت بیشتری است (۳۳).

علی‌رغم انجام مطالعات متعدد با بهره‌گیری از روش‌های مختلف تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، به‌ویژه مدل سنجش مبتنی بر مازادها (SBM)، برای ارزیابی علکرد محیط زیستی صنایع انرژی‌بر در ایران و جهان، بخش عمده پژوهش‌های داخلی بر کارایی فنی و انرژی متمرکز بوده‌اند یا از مدل‌های ساده‌تر و نرم‌افزارهای پایه DEA استفاده کرده‌اند. بررسی پیشینه نیز نشان می‌دهد که در مطالعات موجودِ مرتبط با ارزیابی کارایی زیست‌محیطی، از نرم‌افزار تخصصی MaxDEA برای پیاده‌سازی مدل SBM با خروجی‌های نامطلوب استفاده نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر درصدد است این خلأ پژوهشی را پوشش دهد و کارایی اکولوژیکی ده شرکت بزرگ پتروشیمی بورسی ایران، شامل خلیج فارس، نوری، پردیس، جم، پارس، بوعلی سینا، تندگویان، خارک، مارون و امیرکبیر، را طی دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴ با استفاده از مدل SBM و با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب ارزیابی کند.

10. Rough Set
11. Fuzzy artificial neural network
12. Long-range Energy Alternatives Planning
13. Green Innovation Competitiveness Index

۲. روش‌شناسی

این پژوهش کاربردی با اتخاذ رویکردی کمّی، ارزیابی کارایی اکولوژیکی ده شرکت منتخب پتروشیمی ایران و ارائه راهکارهای سیاستی برای بهبود عملکرد این صنعت را هدف قرار داده است. در این راستا، امتیاز کارایی حاصل از مدل اندازه تفاضلی (SBM) با فرض خروجی نامطلوب (۲۹) به‌عنوان شاخصی عملیاتی برای سنجش رقابت‌پذیری سبز بنگاه‌ها تعریف شده است؛ انتخابی که با توجه به ساختار غیرشعاعی مدل، سنجش دقیقی از همزیستی عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهد (۲۹، ۲۷). در نهایت، یافته‌های این ارزیابی می‌تواند به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای پایش میزان تحقق سیاست‌های کلان ملی در حوزه‌های محیط زیست، انرژی و تاب‌آوری اقتصادی به کار رود و بستر مناسبی را برای هم‌راستایی رشد صنعتی با الزامات پایداری فراهم کند.

۲-۱. کارایی اکولوژیکی

مفهوم کارایی اکولوژیکی نخستین بار توسط شورای کسب‌وکار جهانی برای توسعه پایدار[14] (WBCSD) معرفی شد و به توانایی یک واحد تصمیم‌گیرنده در دستیابی به بیشترین میزان خروجی‌های مطلوب با کمترین مصرف نهاده‌ها و حداقل‌سازی اثرات نامطلوب زیست‌محیطی اشاره دارد (۲۸). این شاخص برخلاف رویکردهای سنجش کارایی سنتی که صرفاً بر ابعاد اقتصادی متمرکز هستند، هم‌زمان بعد تولیدی و بعد زیست‌محیطی عملکرد سیستم را تحلیل می‌کند (۱۹). در صنایع انرژی‌بر و آلاینده مانند پتروشیمی، کارایی اکولوژیکی به‌عنوان معیاری کاربردی برای ارزیابی هم‌زمان بهره‌وری اقتصادی و شدت انتشار آلاینده‌ها استفاده می‌شود (۳۶). بر این اساس، بهبود کارایی اکولوژیکی نشان‌دهنده ارتقای پایداری و حرکت به سمت تحقق اهداف توسعه صنعتی همگام با حفظ محیط‌زیست است (۱۸). در ادامه این پژوهش هرجا از عبارت «رقابت‌پذیری سبز» در تفسیر نتایج استفاده می‌شود، منظور بازتاب این مفهوم از طریق شاخص کارایی اکولوژیک است، نه سنجش مستقیم یا جامع تمامی ابعاد رقابت‌پذیری سبز (نظیر نوآوری یا جایگاه بازار).

۲-۲. روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)

تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) روشی غیرپارامتریک و مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی است که برای ارزیابی کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده با چندین ورودی و چندین خروجی به کار می‌رود. بنیان مفهومی این رویکرد نخستین‌بار توسط فارل در سال ۱۹۵۷ مطرح شد و در ادامه، چارنز، کوپر و رودز در سال ۱۹۷۸ با بسط چارچوب نظری و محاسباتی آن، امکان سنجش هم‌زمان چندین نهاده و ستانده را در قالب یک مدل تحلیلی فراهم کردند (۱۵). بر این اساس، کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده با وجود چندین داده و ستاده به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Efficiency} = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{ri}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij}} \quad (۱)$$

که تابع آن بصورت زیر است:

$$E_i = \frac{u_1 y_{1i} + u_2 y_{2i} + u_3 y_{3i} + \cdots + u_s y_{si}}{v_1 x_{1i} + v_2 x_{2i} + v_3 x_{3i} + \cdots + v_m x_{mi}} \quad (۲)$$

بطوریکه E_i کارایی واحد تصمیم‌گیرنده i با تعداد s خروجی (y) و m ورودی (x) می‌باشد و u_s و v_m به ترتیب اوزان مربوط به خروجی‌ها و ورودی‌ها می‌باشند (۹).

به دلیل مشکلات عملی و محدودیت‌های روش فارل، در خصوص بازده ثابت نسبت به به‌دلیل محدودیت‌های عملی رویکرد فارل، به‌ویژه در چارچوب فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس[15] (CRS)، چارنز، کوپر و رودز (۱۹۷۸) روشی کاربردی برای سنجش کارایی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیرنده با چندین ورودی و خروجی ارائه کردند که بعدها با عنوان تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) شناخته شد (۱۱).

تحلیل پوششی داده‌ها دارای انواع مختلفی است؛ اصلی‌ترین آن با نام روش[16] CCR شناخته می‌شود که برگرفته از نام چارنز، کوپر و رودز است. این مدل فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس روش سنجش کارایی فارل را به حالت چند داده وستاده تعمیم می‌دهد. بنکر، چارنز وکوپر[17] (۱۹۸۴) با توسعه مفاهیم و مدل‌های تحلیل پوشش داده‌ها، مدل BCC را برای تعیین میزان کارایی بدون فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس ارائه کردند (۱۱).

در مطالعات مربوط به کارایی اکولوژیکی، استفاده از مدل‌های استاندارد DEA (مانند CCR و BCC) با محدودیت روبروست زیرا در این مدل‌ها نمی‌توان خروجی‌های نامطلوب مانند انتشار گازهای آلاینده را به درستی در نظر گرفت. برای رفع این مشکل، مدل‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها سنجش

14. World Business Council for Sustainable Development
15. Constant Returns to Scale
16. Charnes-Cooper-Rhodes
17. Banker, Charnes & Cooper

مبتنی بر مازادها (SBM) با خروجی‌های نامطلوب[18] است (۳).

۲-۳. مدل سنجش مبتنی بر مازادها (SBM) با خروجی‌های نامطلوب

این مدل که توسط تن (۲۰۰۱) معرفی شده است، متغیرهای کمکی ورودی و خروجی را مستقیماً در تابع هدف وارد می‌کند و بر خلاف مدل CCR، به تغییرات نامتناسب متغیرها حساس است. یکی از محدودیت‌های مدل‌های کلاسیک تحلیل پوششی داده‌ها (مانند مدل‌های CCR و BCC) این است که همه متغیرها را به صورت درصدی و متناسب تغییر می‌دهند یعنی یا همه ورودی‌ها به صورت درصدی کاهش پیدا می‌کنند یا همه خروجی‌ها به صورت درصدی افزایش. اما در واقعیت ممکن است کاهش یا افزایش به صورت متناسب نباشد. مدل SBM هر متغیر را به صورت جداگانه بررسی می‌کند و اجازه می‌دهد کاهش ورودی‌ها و افزایش خروجی‌ها به صورت نامتناسب انجام شود (۲۹).

در این مدل می‌توان انتشار گازهای گلخانه‌ای را به عنوان خروجی‌های نامطلوب در نظر گرفت که در این صورت این خروجی‌های نامطلوب مانند ورودی‌ها در نظر گرفته می‌شوند (کاهش آن‌ها مطلوب است).

اگر فرض کنیم n واحد تصمیم‌گیرنده (DMU) داریم که هر DMU دارای m ورودی (x_{ij})، s_1 خروجی مطلوب (y_{rj}^{good}) و s_2 خروجی نامطلوب (y_{rj}^{bad}) می‌باشد، آنگاه:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^+}{y_{r0}^{good}} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^{b-}}{y_{r0}^{bad}}\right)} \quad (۳)$$

که در آن:

ρ^*: کارایی بین ۰ تا ۱ است. اگر همه مازادها صفر باشند و $\rho^* = 1$ باشد آنگاه واحد کاملاً کارآمد است.

s_i^-: مازاد ورودی i است.

s_r^+: کمبود خروجی مطلوب r است.

s_r^{b-}: مازاد خروجی نامطلوب r است که باید کاهش یابد (۲۹). استفاده از مدل غیرجهت‌دار SBM با خروجی نامطلوب این امکان را فراهم می‌کند که همزمان عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی شرکت‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد و تصویر دقیق‌تری از رقابت‌پذیری سبز آن‌ها ارائه شود.

۲-۴. معرفی واحدهای تصمیم‌گیرنده، متغیرها و منابع تحقیق

در این پژوهش، ده شرکت بزرگ پتروشیمی بورسی ایران به‌عنوان واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs) انتخاب شدند. این شرکت‌ها شامل هلدینگ‌ها و بنگاه‌های عملیاتی مهمی هستند که می‌توان آن‌ها را نمایندگان مناسبی از صنعت پتروشیمی ایران دانست؛ از جمله صنایع پتروشیمی خلیج فارس، نوری، پردیس، جم، پارس، بوعلی‌سینا، تندگویان، خارک، مارون و امیرکبیر. انتخاب شرکت‌های بورسی نیز به‌دلیل شفافیت بیشتر در گزارش‌دهی مالی و دسترسی آسان‌تر به داده‌ها از طریق سامانه کدال صورت گرفته است.

یکی از پیش‌فرض‌های متعارف در کاربرد تحلیل پوششی داده‌ها، همگنی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده از نظر فناوری تولید و ساختار فرایندی است. در این پژوهش، ده شرکت مورد بررسی از نظر محصول غالب (آروماتیک، اوره/آمونیاک، متانول، الفین/پلیمر) و درنتیجه فناوری و شدت انرژی‌بری فرایند تولید، تفاوت‌های قابل‌توجهی دارند (جدول ۲). اگرچه چنین ناهمگونی می‌تواند بخشی از تنوع کارایی مشاهده‌شده میان شرکت‌ها را توضیح دهد، انتخاب مدل SBM در این پژوهش تا حدی با هدف کاهش اثر این ناهمگونی صورت گرفته است؛ چراکه این مدل بر خلاف مدل‌های کلاسیک (مانند CCR و BCC)، فرض نمی‌کند تغییرات در همه متغیرها متناسب و یکسان است بلکه امکان بررسی مستقل هر نهاده و ستانده را فراهم می‌سازد. با این حال، لازم به تصریح است که این ناهمگونی محصولات می‌تواند به مقایسه مستقیم امتیازهای کارایی میان شرکت‌های با محصول غالب متفاوت آسیب برساند؛ زیرا مرز کارایی مشترک در مدل، لزوماً فناوری بهینه یکسانی را برای فرایندهای تولیدی متفاوت (مانند تولید متانول در برابر تولید محصولات آروماتیکی) ترسیم نمی‌کند. ازاین‌رو، تفسیر نتایج در این پژوهش با تأکید بر تحلیل درون‌گروهی (مقایسه شرکت‌های با محصول مشابه) و تحلیل روند زمانی هر شرکت نسبت به خود در طول دوره صورت گرفته است، نه صرفاً رتبه‌بندی مطلق میان تمامی شرکت‌ها.

کارایی اکولوژیکی این شرکت‌ها در بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴ و بر پایه داده‌های پنل با ۵۰ مشاهده مورد بررسی قرار گرفته است. این دوره زمانی به‌سبب دسترسی مناسب‌تر به گزارش‌های زیست‌محیطی و نیز انطباق با شرایط اقتصادی و تحریمی سال‌های اخیر انتخاب شده است.

متغیرهای این تحقیق که بطور کلی شامل ورودی‌ها، خروجی‌های مطلوب و خروجی‌های نامطلوب می‌شوند، عبارت‌اند از:

18. Undesirable outputs

الف) ورودی‌ها:

- C: سرمایه ثابت (واحد: میلیون ریال)
- L: نیروی کار (واحد: نفر)
- F: مصرف خوراک/انرژی (واحد: میلیون ریال)

لازم به ذکر است که به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های مقدار فیزیکی خوراک و انرژی مصرفی شرکت‌ها (مانند مترمکعب گاز یا تن مواد اولیه)، در این پژوهش از ارزش ریالی هزینه خوراک/انرژی به‌عنوان جانشین مصرف فیزیکی استفاده شده است. این انتخاب با یک محدودیت روش‌شناختی مهم همراه است؛ دوره مورد بررسی (۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴) مقارن با نوسانات قابل‌توجه نرخ ارز، تورم عمومی اقتصاد ایران و تغییرات مکرر سیاست‌های قیمت‌گذاری خوراک پتروشیمی‌ها بوده است. در چنین شرایطی، تغییرات اسمی هزینه خوراک/انرژی می‌تواند تا حدی بازتاب تغییرات قیمت باشد، نه لزوماً تغییر در مقدار فیزیکی مصرف. برای نمونه، افزایش این متغیر در یک سال خاص ممکن است ناشی از تعدیل نرخ خوراک تخصیصی دولت یا تورم بخش انرژی باشد، بدون آنکه مصرف واقعی نهاده تغییر کرده باشد. این موضوع می‌تواند بر دقت کارایی محاسبه‌شده، به‌ویژه در مقایسه‌های بین‌دوره‌ای (میان سال‌های مختلف یک شرکت) اثرگذار باشد و باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد.

ب) خروجی مطلوب[20]:

- R: درآمد عملیاتی[21] (واحد: میلیون ریال)

لازم به ذکر است که در مدل اولیه پژوهش، مقدار تولید محصولات پتروشیمی (P) نیز به‌عنوان یکی از خروجی‌های مطلوب مدل در نظر گرفته شده بود. با این حال، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون میان درآمد عملیاتی (R) و مقدار تولید (P) در سطح کل نمونه (۵۰ مشاهده) نشان داد این دو متغیر همبستگی بسیار قوی ($r = 0.935$) دارند که امری قابل‌انتظار است زیرا درآمد عملیاتی تا حد زیادی تابعی از حاصل‌ضرب حجم تولید در قیمت محصولات است. حضور هم‌زمان دو خروجی با همبستگی زیاد در مدل SBM می‌تواند توان تفکیک‌پذیری مدل را کاهش دهد و موجب آن شود که بخشی از امتیاز کارایی محاسبه‌شده به‌جای بازتاب عملکرد مستقل دو بعد اقتصادی و فیزیکی صرفاً بازتاب این همبستگی ساختاری باشد. به‌منظور جلوگیری از این اثر و ارائه برآوردی دقیق‌تر و قابل‌تفکیک‌تر از کارایی زیست‌محیطی، در مدل نهایی این پژوهش تنها درآمد عملیاتی (R) به‌عنوان خروجی مطلوب اقتصادی در نظر گرفته شده و مقدار تولید (P) از میان خروجی‌های مدل کنار گذاشته شده است. داده‌های مربوط به این متغیر در آمار توصیفی (جدول ۱) به‌منظور ارائه تصویری از مقیاس عملیاتی شرکت‌ها گزارش شده است.

ج) خروجی‌های نامطلوب[22]:

- دی‌اکسید کربن: انتشار دی‌اکسید کربن (واحد: هزار تن)

داده‌های مالی و تولیدی شرکت‌های پتروشیمی (ورودی‌ها و خروجی‌های مطلوب) از سامانه کدال[24] و گزارش‌های سالانه و میان‌ساله و یادداشت‌های توضیحی صورت‌های مالی حسابرسی‌شده استخراج شده است.

با توجه به اینکه شرکت‌های پتروشیمی عموماً داده‌های زیست‌محیطی، به‌ویژه میزان انتشار سالانه و دقیق گاز کربن‌دی‌اکسید، را به‌صورت کامل افشا نمی‌کنند، استخراج این اطلاعات با محدودیت‌های جدی مواجه است. از این‌رو، در پژوهش حاضر داده‌های مربوط به انتشار دی‌اکسید کربن با استفاده از ضریب انتشار برآورد شده است. به‌طور مشخص، میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید از طریق اعمال ضریب انتشار استاندارد بر حجم تولید یا میزان مصرف انرژی محاسبه شده؛ رویکردی که در مطالعات مرتبط با کارایی زیست‌محیطی، به‌عنوان روشی معتبر و پذیرفته‌شده، کاربرد گسترده‌ای دارد[25] (۱۶).

اعداد مربوط به این متغیر از جداول مربوط به هزینه‌کرد شرکت‌های پتروشیمی جهت مواد اولیه سوخت و انرژی استخراج شده است. به دلیل مشکل دستیابی به داده مقدار فیزیکی مواد مصرفی از هزینه (واحد ریالی) استفاده می‌شود.

20. Desirable Outputs
21. Operating Revenue
22. Undesirable Outputs

به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های مربوط به انتشار سایر آلاینده‌های گازی هوا (مانند SOx و NOx)، تمرکز اصلی این تحقیق بر روی انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان مهم‌ترین خروجی نامطلوب بوده است.

24. www.codal.ir
25. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,2006- Volume

لازم به ذکر است در این تحقیق برای پیاده‌سازی مدل سنجش مبتنی بر مازادها با خروجی‌های نامطلوب (SBM-undesirable) از نرم‌افزار تخصصی MaxDEA (نسخه Lite) استفاده شده است. این نرم‌افزار یکی از جامع‌ترین ابزارهای تحلیل پوششی داده‌ها است که قابلیت اجرای مدل با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب را به‌طور کامل فراهم می‌کند (۵).

۳. یافته‌ها

برای سنجش کارایی اکولوژیکی ده شرکت منتخب پتروشیمی ایران، داده‌های مربوط به سرمایه ثابت، نیروی کار، مصرف خوراک، درآمد عملیاتی، میزان تولید و انتشار دی‌اکسید کربن از صورت‌های مالی شرکت‌ها استخراج شد. سپس این داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار تخصصی MaxDEA (نسخه Lite برای محاسبه امتیاز کارایی، مقایسه عملکرد شرکت‌ها و تدوین پیشنهادهای سیاستی به‌منظور بهبود عملکرد صنعت مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۱. آمار توصیفی

یکی از مراحل مهم در تجزیه‌وتحلیل داده‌های پژوهش، ارائه آمار توصیفی متغیرهای تحقیق است. اطلاعات و داده‌های آماری مرتبط با متغیرهای پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. برای توصیف ویژگی‌های متغیرهای تحقیق نیز از شاخص‌های میانگین، میانه، انحراف معیار، بیشینه، کمینه، چولگی و کشیدگی استفاده شده است.

جدول ۱: آماره‌های توصیفی متغیرهای تحقیق

متغیرها	واحد	نماد	میانگین	میانه	انحراف معیار	بیشترین	کمترین	چولگی	کشیدگی
سرمایه ثابت	میلیون ریال	C	۳۸۹۴۸۷۸۹۲	۱۳۴۱۰۸۰۲۵	۸۴۲۶۷۸۹۸۳	۵۱۹۳۴۴۱۸۲۹	۵۰۰۰۵۳۸	۳۳۶۰	۱۱۳۱۸
نیروی کار	نفر	L	۲۰۸۸	۲۲۲۱	۱۰۴۲	۴۷۵۶	۷۳۱	۲۷۳۱	۶۱۱۸
مصرف خوراک	میلیون ریال	F	۴۸۲۹۸۷۴۶۶۳	۲۷۲۱۲۲۷۴۱	۵۸۴۹۳۴۶۷۸	۳۷۰۵۶۵۸۹۸۳	۳۸۶۳۱۰۵۲	۳۶۱۹	۱۵۶۹۱
درآمد عملیاتی	میلیون ریال	R	۸۸۲۹۸۴۶۸۲	۴۵۷۴۹۷۷۵۲	۱۰۴۴۳۶۲۸۹۷	۶۳۶۷۳۸۰۵۵۳	۱۷۰۴۶۴۵۷۲	۳۱۱۴	۱۰۳۷۵
تولید	هزار تن	P	۴۶۸۹	۱۸۳۷	۶۹۴۴	۲۹۳۳۰	۴۵۰	۲۵۹۶	۵۴۱۳
انتشار دی‌اکسید کربن	هزار تن	CO_2	۶۸۹۹	۲۴۱۶	۱۱۴۸۵	۵۲۷۹۴	۸۱۰	۲۵۸۱	۵۳۱۴

منبع: یافته‌های پژوهش

یافته‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که داده‌های جمع‌آوری‌شده در نمونه پژوهش از تنوع و پراکندگی مناسبی برای پیاده‌سازی مدل DEA برخوردار هستند. در این میان، هلدینگ خلیج فارس به‌عنوان بزرگ‌ترین واحد تصمیم‌گیرنده (DMU) در نمونه، با میانگین تولید روزانه حدود ۲۶ هزار تن (فراتر از ۲۹ میلیون تن در سال ۱۴۰۴) و انتشار متناسب دی‌اکسید کربن، مقیاس عملیاتی بسیار بزرگ‌تری نسبت به سایر شرکت‌ها دارد.

میانگین تولید سالانه شرکت‌های مورد بررسی حدود ۷/۴ میلیون تن و میانگین انتشار سالانه دی‌اکسید کربن نیز نزدیک به ۹/۶ میلیون تن است؛ مقادیری که با تصویری کلی از مقیاس فعالیت در صنعت پتروشیمی ایران همخوانی دارد. همچنین، انحراف معیار بالای متغیرهای تولید و انتشار دی‌اکسید کربن از وجود تفاوتی معنادار در اندازه عملیاتی و نوع فناوری شرکت‌ها حکایت دارد؛ به‌گونه‌ای که برخی واحدها با ماهیت آروماتیک‌محور از شدت انتشار کمتری برخوردارند، در حالی‌که شرکت‌های فعال در حوزه متانول و اوره معمولاً سطوح بالاتری از انتشار را تجربه می‌کنند. این ناهمگونی، از منظر روش‌شناختی، هم فرصت و هم چالش ایجاد می‌کند. به‌کارگیری مدل SBM از یک سو، امکان تفکیک دقیق‌تر عملکرد شرکت‌ها را فراهم می‌سازد زیرا بر خلاف مدل‌های کلاسیک تغییرات نامتناسب متغیرها را می‌پذیرد و از سوی دیگر، تفاوت بنیادین در فناوری و فرایند تولید میان محصولات مختلف (مانند متانول در برابر آروماتیک‌ها) این نکته را یادآوری می‌کند که نتایج باید با احتیاط و عمدتاً در چارچوب مقایسه‌های درون‌گروهی یا تحلیل روند زمانی هر شرکت تفسیر شوند، نه صرفاً رتبه‌بندی مطلق میان محصولات ناهم‌جنس.

۳-۲. محاسبه ضریب انتشار

در این مطالعه، به‌دلیل محدودیت دسترسی مستقیم به داده‌های تفصیلی انتشار، میزان انتشار CO_2 از طریق اعمال ضریب انتشار استاندارد بر حجم تولید واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs) برآورد شده است. ضریب انتشار متناسب با نوع محصول تولیدی هر واحد پتروشیمی بین ۸/۰ تا ۲ تن دی‌اکسید کربن به ازای هر تن محصول متغیر است (۱۶). به‌طوری که محصولات پایه نظیر متانول و آمونیاک از ضریب انتشار بالاتری برخوردارند و فرآورده‌های پلیمری ضریب کمتری را به خود اختصاص می‌دهند.

بدین ترتیب با ضرب ضرایب انتشار تخمینی در مقدار تولید هر شرکت، میزان انتشار دی‌اکسید کربن آن بدست آمده است:

$$\text{میزان انتشار دی‌اکسید کربن (هزار تن)} = \text{ضریب انتشار} \times \text{حجم تولید (هزار تن)} \quad (۴)$$

شایان ذکر است که روش برآوردی در این پژوهش، انتشار دی‌اکسید کربن را به‌صورت خطی و متناسب با مقدار تولید (P) محاسبه می‌کند (رابطه ۴). این رویکرد، که به‌دلیل نبود داده مستقیم و مقطعی از میزان انتشار واقعی شرکت‌ها اتخاذ شده است به این معناست که خروجی نامطلوب (دی‌اکسید کربن) و یکی از خروجی‌های مطلوب مدل (P) از نظر ریاضی با یکدیگر همبستگی ساختاری دارند. این همبستگی می‌تواند بخشی از توان تفکیک‌پذیری مدل SBM را در تمایز میان کارایی واقعی زیست‌محیطی و صرفاً مقیاس تولید کاهش دهد؛ به‌عبارت دیگر، بخشی از تغییرات هم‌زمان در P و دی‌اکسید کربن که در مدل مشاهده می‌شود، ناشی از نحوه برآورد است، نه لزوماً بازتاب مستقل عملکرد زیست‌محیطی شرکت‌ها. با این حال، ازآنجاکه ضریب انتشار به‌کاررفته برای هر شرکت متناسب با نوع محصول غالب آن متفاوت است (نوسان بین ۸/۰ تا ۲ تن دی‌اکسید کربن به ازای هر تن محصول، مطابق جدول ۲)، نسبت دی‌اکسید کربن به P در سطح کل نمونه ثابت نیست و صرفاً درون هر واحد تصمیم‌گیرنده و در طول زمان یک ضریب نسبتاً پایدار فرض شده است. این تمایز باعث می‌شود مدل بتواند شرکت‌های با ترکیب محصولی متفاوت را بر اساس شدت انتشار نسبی آن‌ها از هم تفکیک کند، هرچند در سطح مقایسه‌های درون‌شرکتی و بین سال‌های مختلف یک شرکت واحد، این وابستگی خطی می‌تواند اثرگذار باشد.

جدول ۲: محصولات تولیدی و ضریب انتشار دی‌اکسید کربن شرکت‌های پتروشیمی

ردیف	شرکت	محصولات اصلی (سهم)	محصول غالب	ضریب انتشار CO_2 تخمینی
۱	خلیج فارس	آروماتیک، الفین، پلیمر، اوره	آروماتیک + اوره	۱/۸
۲	نوری	آروماتیک‌ها (پارازایلن، بنزن، ارتوزایلن)	پارازایلن و بنزن	۱/۱
۳	پردیس	اوره و آمونیاک	اوره	۲/۳
۴	جم	الفین‌ها و پلیمرها (اتیلن، پروپیلن، PP، PE)	الفین و پلیمرها	۱/۶
۵	پارس	آروماتیک و محصولات شیمیایی	آروماتیک‌ها	۱/۲
۶	بوعلی‌سینا	آروماتیک‌ها (بنزن، تولوئن، زایلن)	آروماتیک‌ها	۱/۲
۷	تندگویان	PET و PTA و پلی استر	PTA و PET	۱/۸
۸	خارک	متانول	متانول	۲/۴
۹	مارون	الفین‌ها، پلیمرها، اکسید اتیلن	الفین و پلیمرها	۱/۷
۱۰	امیرکبیر	پلی اتیلن و PVC و محصولات شیمیایی	پلی اتیلن و PVC	۱/۸

منبع: یافته‌های پژوهش بر اساس ضریب انتشار استاندارد صنعت پتروشیمی ایران (۲۲).

۳-۳. محاسبه امتیاز کارایی واحدهای تصمیم‌گیرنده (DMUs)

در این مطالعه، کارایی اکولوژیکی ده شرکت پتروشیمی (شامل صنایع پتروشیمی خلیج فارس، نوری، پردیس، جم، پارس، بوعلی سینا، تندگویان، خارک، مارون و امیرکبیر) بر اساس متغیرهای سرمایه ثابت، نیروی کار و مصرف انرژی به عنوان نهاده‌ها (ورودی‌ها)، درآمد عملیاتی و مقدار تولید به عنوان ستانده‌های مطلوب (خروجی‌های مطلوب)، و میزان انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان ستانده نامطلوب (خروجی نامطلوب) ارزیابی شده است. این سنجش با بهره‌گیری از مدل تفاضل‌مبنا (SBM) و با استفاده از نرم‌افزار تخصصی MaxDEA انجام گرفته و امتیاز کارایی استخراج‌شده برای این شرکت‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: امتیاز کارایی شرکت‌های پتروشیمی

واحد تصمیم‌گیرنده	امتیاز کارایی					میانگین کارایی	رتبه (بر اساس میا
	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴		
امیرکبیر	۱	۱	۱	۱	۱	۱/۰۰۰	۱
بوعلی‌سینا	۱	۰/۹۰۵	۱	۱	۱	۰/۹۸۱	۲
خلیج فارس	۱	۱	۱	۰/۸۷۶	۱	۰/۹۷۵	۳
پردیس	۱	۱	۰/۷۹۸	۱	۱	۰/۹۶۰	۴
پارس	۱	۱	۱	۱	۰/۷۷۸	۰/۹۵۶	۵
خارک	۱	۰/۹۵۰	۰/۹۱۵	۰/۹۰۳	۱	۰/۹۵۴	۶
تندگویان	۰/۸۹۵	۰/۷۹۶	۱	۰/۸۵۳	۱	۰/۹۰۹	۷
مارون	۱	۰/۵۴۶	۰/۹۰۹	۱	۱	۰/۸۹۱	۸
نوری	۱	۰/۵۲۴	۰/۷۱۶	۱	۱	۰/۸۴۸	۹
جم	۰/۵۹۴	۰/۶۱۹	۰/۷۲۰	۱	۱	۰/۷۸۷	۱۰
						میانگین کل نمونه: ۰/۹۴۸	

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از اجرای مدل SBM نشان می‌دهد که شرکت پتروشیمی امیرکبیر در تمام سال‌های مورد بررسی، امتیاز کارایی ۱ را کسب کرده و به‌طور پیوسته بر مرز کارایی قرار داشته است. این وضعیت بیانگر آن است که این شرکت از بالاترین سطح کارایی زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی رقابت‌پذیری سبز، برخوردار است و می‌توان آن را به‌عنوان واحد مرجع اصلی برای سایر بنگاه‌های این صنعت در نظر گرفت. شرکت‌های بوعلی‌سینا (۰/۹۸۱)، خلیج فارس (۰/۹۷۵)، پردیس (۰/۹۶۰)، پارس (۰/۹۵۶) و خارک (۰/۹۵۴) نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفته و در اکثر سال‌های دوره مورد بررسی به مرز کارایی نزدیک بوده‌اند. هرچند برخلاف شرکت امیرکبیر، هر یک در حداقل یک سال از دوره با افت کارایی مواجه شده‌اند. در مقابل، شرکت‌های پتروشیمی جم (با میانگین ۰/۷۸۷) و نوری (با میانگین ۰/۸۴۸) کمترین امتیاز کارایی اکولوژیکی را به خود اختصاص داده و در مقایسه با سایر شرکت‌های مورد مطالعه از سطح پایین‌تری از کارایی زیست‌محیطی، یکی از ارکان کلیدی رقابت‌پذیری سبز، برخوردار بوده‌اند.

شرکت پتروشیمی نوری در سال ۱۴۰۱ با کسب امتیاز ۰/۵۲۴ و شرکت پتروشیمی مارون در همان سال با امتیاز ۰/۵۴۶، ضعیف‌ترین عملکرد زیست‌محیطی را در میان مشاهدات مورد بررسی ثبت کرده‌اند. تحلیل مازادها نشان می‌دهد که ناکارایی این مشاهدات عمدتاً ناشی از مصرف بالای خوراک و انرژی، همراه با انتشار نسبتاً زیاد دی‌اکسید کربن در مقایسه با درآمد عملیاتی حاصله بوده است. شرکت پتروشیمی جم نیز طی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ به‌طور مستمر امتیازهایی پایین‌تر از ۰/۷۳ ثبت کرده که بیانگر فاصله معنادار و پایدار این شرکت از اهداف رقابت‌پذیری سبز و سیاست‌های کلی محیط زیستی و اقتصاد مقاومتی در تعدادی از سال‌های دوره مورد بررسی است.

پتروشیمی پردیس به‌عنوان تولیدکننده اوره، در سال ۱۴۰۲ با امتیاز ۰/۷۹۸ ناکارایی نسبی قابل‌توجهی نشان داده که می‌تواند با ماهیت انتشاربر فرایند تولید آمونیاک و اوره مرتبط باشد. به‌طور کلی، میانگین کارایی اکولوژیکی شرکت‌های نمونه برابر با ۰/۹۲۶ است که از وجود ظرفیتی در حدود ۷/۴ درصد برای بهبود عملکرد کلی صنعت و ارتقای رقابت‌پذیری سبز آن حکایت دارد. این یافته‌ها همچنان با نتایج مطالعات مدیرزاده و همکاران (۲۰۲۴) و حسینی و استفانیک (۲۰۱۹) هم‌راستا است (۲۲، ۱۴).

۳-۴. تحلیل رابطه ضریب انتشار با ثبات کارایی

مقایسه جدول ۲ و ۳ نشان می‌دهد شرکت‌هایی که بر روی مرز کارایی یا نزدیک به آن ایستاده‌اند، لزوماً شرکت‌هایی با ضریب انتشار پایین نیستند. برای مثال، شرکت پتروشیمی امیرکبیر با ضریب انتشار نسبتاً بالا (۱/۸) امتیاز کارایی کامل (۱/۰۰۰) را در تمام دوره کسب کرده و شرکت خارک با وجود برخورداری از بالاترین ضریب انتشار در کل نمونه (۲/۴)، میانگین کارایی نسبتاً بالایی (۰/۹۵۴) به‌دست آورده و در رتبه ششم از ده شرکت قرار گرفته است. در مقابل، شرکت پتروشیمی نوری با ضریب انتشار به‌مراتب پایین‌تر (۱/۱) میانگین کارایی به‌مراتب ضعیف‌تری (۰/۸۴۸) دارد و در رتبه نهم قرار می‌گیرد. این امر ثابت می‌کند که رقابت‌پذیری سبز در مدل SBM صرفاً به معنای تولید محصول پاک‌تر نیست، بلکه به معنای توانایی ایجاد ارزش اقتصادی بالاتر (درآمد عملیاتی) است. این در حالی است که خارک و امیرکبیر توانسته‌اند با بهینه‌سازی نسبت درآمد به نهاده‌های مصرفی، اثر خروجی نامطلوب (کربن) خود را در مدل به‌طور

نسبی خنثی کنند. در حالی که نوری، علی‌رغم برخورداری از ضریب انتشار پایین‌تر، به‌دلیل نوسان در نسبت درآمد عملیاتی به هزینه‌های خوراک و انرژی در برخی سال‌ها (بخصوص سال ۱۴۰۱) ناکارآمد نشان داده شده است.

۳-۵. نوسان‌پذیری کارایی اکولوژیکی و پایداری رقابت‌پذیری سبز

طبق نتایج روند کارایی برخی شرکت‌ها کاملاً صعودی بوده است. پتروشیمی جم از ۰/۵۹۴ در سال ۱۴۰۰ به امتیاز ۱ در سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ رسیده است. در مقابل، شرکت خارک روند نزولی را تجربه کرده و از امتیاز ۱ در سال ۱۴۰۰ به ۰/۹۰۳ در سال ۱۴۰۳ رسیده و سپس در ۱۴۰۴ مجدداً احیا شده است. این پویایی زمانی نشان می‌دهد که کارایی زیست‌محیطی محاسبه‌شده در این مدل، وضعیتی ثابت نیست. صعود پتروشیمی جم می‌تواند نشان‌دهنده اثربخشی پروژه‌های بهبود فرایند، کاهش هدررفت انرژی یا افزایش قیمت‌های فروش (خروجی مطلوب) در سال‌های پایانی دوره باشد؛ هرچند تفکیک دقیق سهم هر یک از این عوامل نیازمند داده‌ها و بررسی بیشتر است. در مقابل، روند نزولی خارک (تولیدکننده متانول با بالاترین ضریب انتشار نمونه، ۲/۴) با این احتمال سازگار است که نوسانات قیمت جهانی متانول یا قطعی خوراک گاز در سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳، پتروشیمی‌های تک‌محصولی کربن‌بر را در برابر ناپایداری‌های زیست‌محیطی_اقتصادی آسیب‌پذیرتر کرده است که البته نظر قطعی درباره این موضوع نیز نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

۳-۶. پایش مصداقی سیاست‌های راهبردی

به‌منظور پاسخ‌گویی به هدف اصلی پژوهش مبنی بر پایش راهبردی سیاست‌های محیط‌زیستی صنعت پتروشیمی، در این بخش یافته‌های کمی پژوهش به‌طور مستقیم با شاخص‌ها و اهداف مندرج در اسناد بالادستی تطبیق داده شده است. جدول ۴ نشان‌دهنده وضعیت موجود صنعت (بر اساس یافته‌های این پژوهش) و وضعیت مطلوب و مورد نظر هر یک از این اسناد می‌باشد.

جدول ۴: مقایسه وضعیت موجود صنعت پتروشیمی با اهداف سیاست‌های راهبردی

سند سیاستی / بند مرتبط	شاخص مصداقی	وضعیت موجود (یافته پژوهش)	فاصله تا وضعیت مطلوب	راهکار پیشنهادی مبتنی بر یافته‌ها
سیاست‌های کلی انرژی (بهینه‌سازی مصرف و تکمیل زنجیره ارزش)	نسبت کارایی مصرف خوراک/انرژی به واحد ستانده (امتیاز SBM)	میانگین کارایی صنعت ۹۲۶/۰	حدود ۴/۷ درصد فاصله از مرز کارایی در سطح صنعت؛ در شرکت جم این فاصله به‌طور میانگین حدود ۲۱ درصد و در نوری حدود ۱۵ درصد است	اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در بهبود فناوری فرایند برای شرکت‌های زیر مرز کارایی (جم، نوری، مارون و تندگویان)
سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی، بندهای ۳ و ۴ (رشد بهره‌وری و کاهش شدت انرژی)	تحقق هم‌زمان بهره‌وری اقتصادی و کاهش شدت انرژی	شرکت امیرکبیر در تمام دوره و شرکت‌های بوعلی سینا، خلیج فارس، پردیس و پارس در بیشتر سال‌ها بر مرز کارایی یا بسیار نزدیک به آن قرار دارند	بخش قابل‌توجهی از مشاهدات (عمدتاً جم، نوری، مارون و تندگویان) هنوز به این بند دست نیافته‌اند	طراحی سازوکار تشویقی_تنبیهی متناسب با فاصله هر شرکت از مرز کارایی، به‌جای رویکرد یکسان برای کل صنعت
سیاست‌های کلی محیط زیست (ابلاغی ۱۳۹۴)، مدیریت یکپارچه منابع حیاتی آب و هوا	شدت انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به ستانده	مازاد انتشار دی‌اکسید کربن عمدتاً در شرکت‌های ناکارا شناسایی شده است	فاصله معنادار در شرکت‌های تک‌محصولی کربن‌بر (به‌ویژه خارک و برخی سال‌های مارون و جم)	الزام گزارش‌دهی ESG و پایش دوره‌ای انتشار برای شرکت‌های زیر مرز کارایی، مطابق پیشنهاد بخش نتیجه‌گیری

منبع: یافته‌های پژوهش؛ تطبیق‌یافته با سیاست‌های کلی انرژی، سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی (ابلاغی ۱۳۹۲) و سیاست‌های کلی محیط زیست (ابلاغی ۱۳۹۴)

این تطبیق نشان می‌دهد که اگرچه صنعت پتروشیمی ایران در سطح کلان با فاصله نسبتاً محدودی (۴/۷ درصد) از وضعیت مطلوب مندرج در سیاست‌های کلی انرژی و اقتصاد مقاومتی قرار دارد، این فاصله در سطح شرکت‌های منفرد به‌شدت ناهمگن است؛ به‌طوری‌که شکاف شرکت‌های جم و نوری با مرز کارایی، چندین برابر میانگین صنعت است. این یافته، ضرورت طراحی سیاست‌های تفکیک‌شده و متناسب با وضعیت هر بنگاه، به‌جای رویکردهای یکسان بخشی، را برای دستیابی هم‌زمان به اهداف بندهای ۳ و ۴ سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی و سیاست‌های کلی محیط زیست برجسته می‌سازد.

۴. نتیجه‌گیری

صنعت پتروشیمی، به‌عنوان یکی از ارکان اصلی زنجیره ارزش نفت و گاز، سهمی تعیین‌کننده در تولید ناخالص داخلی، صادرات غیرنفتی، ارزآوری و اشتغال دارد؛ با این حال، به‌واسطه ماهیت فرایندهای تولیدی، از منابع مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور نیز به شمار می‌رود. از این منظر، ارزیابی کارایی اکولوژیکی و رقابت‌پذیری سبز شرکت‌های پتروشیمی، نه فقط یک سنجش بنگاهی، بلکه ابزاری راهبردی برای بررسی میزان هم‌سویی این صنعت با سیاست‌های کلی محیط زیست، انرژی و اقتصاد مقاومتی است.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی زیست‌محیطی و رقابت‌پذیری سبز ده شرکت بزرگ پتروشیمی بورسی ایران در دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴ و با استفاده از

مدل سنجش مبتنی بر مازادها با خروجی نامطلوب انجام شد. نتایج نشان می‌دهد میانگین کارایی زیست‌محیطی نمونه برابر با ۹۲۶/۰ است که بیانگر وجود پتانسیل بهبود حدود ۴/۷ درصدی در عملکرد کلی صنعت و ارتقای رقابت‌پذیری سبز آن می‌باشد. شرکت امیرکبیر در تمام سال‌های مورد بررسی بر مرز کارایی قرار داشته و به‌عنوان واحدهای مرجع، بالاترین سطح کارایی زیست‌محیطی را که یکی از ارکان کلیدی رقابت‌پذیری سبز محسوب می‌شود، به نمایش گذاشته است. در مقابل، شرکت‌های جم و نوری پایین‌ترین میانگین کارایی را به خود اختصاص داده‌اند. تحلیل مازادها نیز نشان داد که منشأ اصلی ناکارایی، مصرف بیش از حد خوراک و انرژی، همراه با انتشار بالاتر دی‌اکسید کربن بوده است. افزون بر این، نتایج بیانگر آن است که نوع محصول غالب شرکت‌ها نیز در تعیین سطح کارایی زیست‌محیطی و رقابت‌پذیری سبز نقش معناداری دارد.

در عین حال، یافته‌ها نشان می‌دهد که تفاوت در کارایی را نمی‌توان صرفاً به ماهیت محصول نسبت داد بلکه شرایط عملیاتی، دسترسی به خوراک و کیفیت مدیریت فرایند نیز در این زمینه تعیین‌کننده‌اند. برای مثال کاهش عملکرد خارک در سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۳ را می‌توان در پیوند با آسیب‌پذیری بیشتر واحدهای گازپایه در برابر ناترازی گاز و اختلال در تأمین خوراک تفسیر کرد؛ وضعیتی که به کاهش خروجی مطلوب، بدون کاهش متناسب در مصرف انرژی و انتشار پایه، منجر می‌شود. همچنین، مقایسه مارون و امیرکبیر با وجود شباهت نسبی در زنجیره تولید، نشان می‌دهد که شکاف کارایی می‌تواند بازتابی از تفاوت در بهره‌وری عملیاتی، کیفیت مدیریت داخلی و وضعیت فناوری باشد. از سوی دیگر، امتیاز کارایی هلدینگ خلیج فارس (۹۷۵/۰) در کنار سهم بالای آن در تولید، نشان می‌دهد که مقیاس فعالیت و توان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بهبوددهنده محیط‌زیست می‌تواند در تقویت رقابت‌پذیری سبز نقش مهمی ایفا کند.

با توجه به پایش مصداقی ارائه‌شده در این پژوهش، می‌توان گفت صنعت پتروشیمی ایران در سطح کلان با فاصله محدودی از تحقق کامل اهداف بندهای ۳ و ۴ سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی (رشد بهره‌وری، رقابت‌پذیری اقتصاد و کاهش شدت انرژی) قرار دارد؛ اما این تحقق در سطح بنگاهی به‌شدت ناهمگن است و مستلزم سیاست‌گذاری متمایز برای شرکت‌های دورتر از مرز کارایی (جم، نوری، تندگویان، مارون) است. چنین رویکرد تفکیک‌شده‌ای می‌تواند ابزار عملیاتی مشخصی برای پایش دوره‌ای تحقق سیاست‌های کلی محیط زیست، انرژی و اقتصاد مقاومتی در اختیار سیاست‌گذاران این صنعت راهبردی قرار دهد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پایش و ارزیابی راهبردی میزان پیشرفت صنعت پتروشیمی در تحقق سیاست‌های کلی محیط زیست، سیاست‌های کلی انرژی، الزامات مرتبط با بهره‌وری و کاهش شدت انرژی در سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی به کار گرفته شود. بر این اساس، الگوبرداری از شرکت‌های دارای عملکرد برتر، تسهیل انتقال دانش و فناوری‌های پاک، و طراحی سازوکارهای تشویقی–تنبیهی مبتنی بر عملکرد زیست‌محیطی، می‌تواند زمینه ارتقای کارایی را در سطح صنعت فراهم سازد. در همین راستا، اعطای مشوق‌های مالیاتی، تسهیلات بانکی ترجیحی و اولویت در تخصیص خوراک به شرکت‌های کارآمد، در کنار اعمال محدودیت‌ها و هزینه‌های محیط‌زیستی بیشتر برای واحدهای ناکارآمد، می‌تواند انگیزه لازم برای حرکت به سوی رقابت‌پذیری سبز را تقویت کند. همچنین، هدایت هدفمند سرمایه‌گذاری‌ها به سوی کاهش انتشار کربن، بهینه‌سازی مصرف انرژی و نوسازی فناوری در شرکت‌های ضعیف‌تر، همراه با الزام شرکت‌های بورسی به شفافیت بیشتر در گزارش‌دهی پایداری، از جمله اقدامات مؤثر در این زمینه است. در این میان، استفاده از شاخص کارایی زیست‌محیطی مبتنی بر مدل‌های SBM به‌عنوان یکی از معیارهای ارزیابی عملکرد سبز صنعت پتروشیمی، می‌تواند جایگاه مهمی در نظام نظارت و ارزیابی راهبردی سیاست‌های کلان داشته باشد.

لذا اگرچه این پژوهش، با شناسایی واحدهای مرجع و نیز منابع اصلی ناکارایی، می‌تواند به سیاست‌گذاران در جهت‌دهی مؤثرتر منابع محدود برای بهبود عملکرد سبز و تقویت رقابت‌پذیری پایدار صنعت پتروشیمی یاری رساند. با این حال، محدودیت اصلی مطالعه، استفاده از داده‌های برآوردی (نه اندازه‌گیری‌شده) برای انتشار دی‌اکسیدکربن، بر مبنای ضرایب استاندارد IPCC متناسب با نوع محصول است. ازآنجاکه این برآورد به‌صورت خطی از مقدار تولید مشتق شده است، همبستگی ساختاری میان خروجی مطلوب تولید و خروجی نامطلوب انتشار ایجاد می‌کند که می‌تواند بخشی از نتایج کارایی محاسبه‌شده را متأثر سازد؛ ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، با دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری‌شده و مستقل انتشار (مانند گزارش‌های پایش یا اظهارنامه‌های زیست‌محیطی شرکت‌ها)، این وابستگی مکانیکی برطرف و نتایج با دقت بیشتری اعتبارسنجی شود. علاوه بر این، استفاده از ارزش ریالی هزینه خوراک/انرژی به‌جای مقدار فیزیکی مصرف، در بستر نوسانات قیمتی و تورمی قابل‌توجه سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۴، محدودیت دیگری است که تفسیر نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی در صورت دسترسی، از داده‌های مقدار فیزیکی خوراک (مانند تن یا مترمکعب) یا دست‌کم از ارقام تعدیل‌شده با شاخص قیمت بخش انرژی استفاده کنند. در نهایت، ارتقای کارایی زیست‌محیطی و رقابت‌پذیری سبز در صنعت پتروشیمی، علاوه بر کاهش آلودگی و تقویت ایفای تعهدات محیط‌زیستی، می‌تواند پایداری بلندمدت، تاب‌آوری و قدرت رقابت بین‌المللی این صنعت راهبردی را نیز در چارچوب سیاست‌های کلان کشور تحکیم کند.

ملاحظات اخلاقی و تعهدات

ملاحظات اخلاقی: این مقاله با رعایت اصول اخلاقی در پژوهش انجام شده است.

حامی مالی: این مقاله حامی مالی ندارد.

مشارکت نویسندگان: تمام نویسندگان در آماده‌سازی این مقاله مشارکت کرده‌اند.

تعارض منافع: بنابه اظهار نویسندگان، در این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

تعهد کپی‌رایت: طبق تعهد نویسندگان، حق کپی‌رایت (CC) رعایت شده است.

سپاس‌گذاری: این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری نویسنده دوم است.

منابع

[۱] Algieri, B., Aquino, A., & Succurro, M. (2025). Green-go: A green innovation competitiveness index. *Sustainable Futures*, 10, 101062. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101062

[۲] Bazargan, A. R., Najafi, S. E., Hosseinzadeh Lotfi, F., & Fallah, M. (2023). Technical analysis of petrochemical industries of Iran using a network data envelopment analysis model. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 12(4), 337–363. https://doi.org/10.22105/riej.2023.384254.1366

[۳] Chang, Y., Park, H., Jeong, J., & Lee, J. (2014). Evaluating economic and environmental efficiency of global airlines: A SBM-DEA approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 27, 46–50. https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.12.013

[۴] 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

[۵] Cheng, G. (2014). *Data Envelopment Analysis: Methods and MaxDEA Software*. Intellectual Property Publishing House.

[۶] Chygryn, O., Rosokhata, A., Rybina, O., & Stoyanets, N. (2021). Green competitiveness: The evolution of concept formation. *E3S Web of Conferences*, 234, Article 00004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400004

[۷] Emami Meybodi, A., & Jaydari, F. (2014). Measuring eco-efficiency of Iran's oil refineries using data envelopment analysis. *Economic Research and Perspectives*, 14(4), 79–96. https://ecor.modares.ac.ir/article_13267.html (in Persian).

[۸] Emami Meybodi, A., Ghiyasi, M., & Mokari, M. (2016). Optimization of Iranian gas refineries with environmental approach in data envelopment analysis framework. *Economic Strategy*, 5(16), 211–240. https://econrahbord.csr.ir/article_103309.html (in Persian).

[۹] Farrel, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of Royal Statistical Society*, 120, 253–281.

[۱۰] Geng, Z., Zeng, R., Han, Y., Zhong, Y., & Fu, H. (2019). Energy efficiency evaluation and energy saving based on DEA integrated affinity propagation clustering: Case study of complex petrochemical industries. *Energy*, 179, 863–875. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.042

[۱۱] Hajiha, Z., & Ghilavi, M. (2012). Using data envelopment analysis technique to measure the efficiency of manufacturing companies listed on the Tehran Stock Exchange based on a financial reporting model. *Financial Engineering and Portfolio Management*, 3(12), 111–130. https://sid.ir/paper/197663/fa (in Persian).

[۱۲] Hausmann, R., Hwang, J., & Rodrik, D. (2007). What you export matters. *Journal of Economic Growth*, 12(1), 1–25. https://doi.org/10.1007/s10887-006-9009-4

[۱۳] He, Y., Tang, C., Zhang, D., & Liao, N. (2023). Assessing the effects of the influencing factors on industrial green competitiveness fusing fuzzy C-means, rough set and fuzzy artificial neural network methods. *Ecological Indicators*, 147, 109921. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109921

[۱۴] Hosseini, K., & Stefaniec, A. (2019). Efficiency assessment of Iran's petroleum refining industry in the presence of unprofitable output: A dynamic two-stage slacks-based measure. *Energy*, 189, 116112. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116112

[۱۵] Huguenin, J.-M. (2012). *Data Envelopment Analysis (DEA): A pedagogical guide for decision makers in the public sector* (Cahier de l'IDHEAP No. 276). Institut de hautes études en administration publique (IDHEAP). https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_0FC432348A97.P001/REF

[۱۶] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006), Volume 3: Industrial Processes and Product Use (IPPU). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html

[۱۷] Izadi, H. R., & Parseh, Z. (2024). Investigating the relationship between petrochemical products exports and environmental pollution. *Quarterly Journal of Environmental Economics and Natural Resources*, 9(4), 59–83. https://doi.org/10.22054/eenr.2025.81348.189 (in Persian).

[۱۸] Jollands, N., Lermit, J., & Patterson, M. (2004). Aggregate eco-efficiency indices for New Zealand—a principal components analysis. *Journal of Environmental Management*, 73(4), 293–305. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.07.002

[۱۹] Kuosmanen, T., & Kortelainen, M. (2005). Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 59–72. https://doi.org/10.1162/108819805775247846

[۲۰] Lin, X., Zhu, X., Han, Y., Geng, Z., & Liu, L. (2020). Economy and carbon dioxide emissions effects of energy structures in the world: Evidence based on SBM-DEA model. *Science of The Total Environment*, 729, 138947. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138947

[۲۱] Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., & Khalifah, Z. (2017). A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) applications in energy and environmental studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 402–422. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.030

[۲۲] Modirzadeh, S. A., Khazaei, A., GhasemiKafrudi, E., Sobhani, Z., Kashefi, K., Moradi, M. A., & Moradzadeh, M. (2024). Potentials of greenhouse gas emission reduction through energy efficiency improvement in Iran's petrochemical sector. *Energy*, 311, 133297. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133297

[۲۳] Mousavi, S. M., & Naderizadeh, N. (2024). Optimizing environmental efficiency in the petrochemical industry using data envelopment analysis (DEA): Evaluation and management of undesirable outputs in Nouri Petrochemical. *Journal of Management and Industrial Engineering Research*, 19(6), 1–13. https://www.jomaier.ir/showpaper/1899737 (in Persian).

[۲۴] Mozaffari, M. R., Mohammadi, S., Wanke, P. F., & Correa, H. L. (2021). Towards greener petrochemical production: Two-stage network data envelopment analysis in a fully fuzzy environment in the presence of undesirable outputs. *Expert Systems with Applications*, 164, 113903. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113903

[۲۵] OECD. (2011). *Fostering Innovation for Green Growth*. Paris: OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/fostering-innovation-for-green-growth_9789264119925-en.html

[۲۶] Ohadi, N., Shahraki, J., Pahlavani, M., & Mardani Najafabadi, M. (2019). Evaluating carbon environmental efficiency with imprecise data using fuzzy data envelopment analysis (Case study: Iran and oil-rich countries). *Economic Research and Perspectives*, 19(4), 111–130. https://ecor.modares.ac.ir/article_13443.html (in Persian).

[۲۷] 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

[۲۸] Schmidheiny, S. (1992). *Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment*. MIT Press. https://doi.org/10.1016/0921-8009(94)90100-7

[۲۹] 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

[۳۰] Tone, K. (2004). Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach. *GRIPS Research Report*. https://doi.org/10.24545/00000955

[۳۱] UNCTAD. (2021). *Commodities and Development Report 2021: Escaping the Commodity Dependence Trap through Technology and Innovation*. Geneva: United Nations. https://unctad.org/publication/commodities-and-development-report-2021

[۳۲] UNIDO. (2013). *Industrial Development Report 2013: Sustaining Employment Growth—The Role of Manufacturing and Structural Change*. Vienna: United Nations Industrial Development Organization. https://www.unido.org/sites/default/files/2013-12/UNIDO_IDR_2013_main_report_0.pdf

[۳۳] Wang, Z., & Fan, Z. (2025). Green sustainability assessment and efficiency improvement study of international oil and gas companies: Based on data envelopment analysis. *Heliyon*, 11, e40942. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40942

[۳۴] World Bank. (2020). *Trading for Development in the Age of Global Value Chains*. Washington, DC: World Bank. https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2020

[۳۵] Yavari, A., Gharehbiglou, H., Alavi Matin, Y., & Feghhi Farahmand, N. (2023). The green marketing model of the oil industry based on general environmental policies. *Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies*, 11(44), 687–716. https://doi.org/10.30507/jmsp.2023.382917.2532 (in Persian).

[۳۶] Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. *Energy Economics*, 30(1), 1–14. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.05.001

[۳۷] Zhu, L., Luo, J., Dong, Q., Zhao, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2021). Green technology innovation efficiency of energy-intensive industries in China from the perspective of shared resources: Dynamic change and improvement path. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120890. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120890