



Assessing Provincial Energy Efficiency Considering the Social Cost of Greenhouse Gases: A Three-Level Cross-Border Approach in Iran

Seyyed Hamidreza Zakeri¹, Sajjad Faraji Dizaji², Abbas Assari Arani³, Hossein Sadeghi Saghdel⁴

1. PhD Candidate, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. h_zakeri@modares.ac.ir

2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. s_dizaji@modares.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. assari_a@modares.ac.ir

4. Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. sadeghih@modares.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	This study aims to measure energy efficiency and decompose the sources of inefficiency across 31 provinces of Iran during 202 by employing a three-level cross-frontier framework based on the SBM–VRS model. In the model, capital stock, labor, and energy consumption measured in barrels of oil equivalent are included as inputs; gross provincial product is specified as the desirable output; and the social costs of emissions of carbon dioxide, methane, and nitrogen oxides are incorporated as undesirable outputs. Provincial efficiency is calculated at three levels: the climate–economic-sector frontier, the economic-sector frontier, and the national cross-frontier, and overall inefficiency is decomposed into managerial, climatic-regional, and technological-structural components. The results show that average energy efficiency decreases as the reference set expands, from 0.926 at the climate–economic-sector level to 0.742 at the economic-sector level and 0.46 at the national cross-frontier level. Only seven provinces—Ilam, Bushehr, Tehran, South Khorasan, North Khorasan, Khuzestan, and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad—are efficient at all three levels. The national technical energy-saving potential in 2021 is estimated at approximately 885.5 million barrels of oil equivalent, of which 13 percent is attributable to managerial inefficiency, 46.3 percent to the climatic-regional component, and 40.7 percent to the technological-structural component. Therefore, the majority of the potential for improving efficiency is associated with the gap between regional and technological frontiers, and a uniform policy approach for all provinces is not appropriate. Improving energy efficiency requires a combination of better consumption management, development of infrastructure suited to regional conditions, and modernization of production technology and structure.
Article history: Received: December 2025 Accepted: September 2026	
JEL: Q52, R11, D24, C61.	
Keywords: Total-Factor Energy Efficiency, SBM–VRS, Super-SBM, Three-Level SBM-Based Cross-Frontier Model, Social Cost of Greenhouse Gas Emissions.	

Cite this article S Zakeri, S. H., Faraji Dizaji, S., Assari Arani, A., & Sadeghi Saghdel, H. (2026). Assessing Provincial Energy Efficiency Considering the Social Cost of Greenhouse Gases: A Three-Level Cross-Border Approach in Iran . *Applied Theories of Economic*, 13(3), 81-112.

<https://doi.org/10.22034/ecoj.2026.70352.3479>



© The Author(s).

Publisher: University of Tabriz

DOI: 10.22034/ecoj.2026.70352.3479

Introduction

Agriculture is recognized as a major pillar of global food security, yet it is constantly threatened by High energy intensity, extensive energy subsidies, and dependence on hydrocarbon resources have made energy efficiency one of the major policy concerns in Iran. However, Iran's provinces differ substantially in terms of climate, economic structure, infrastructure, and fuel consumption patterns. Therefore, evaluating all provinces against a single production frontier may mistakenly attribute climatic and structural differences to managerial inefficiency. In addition, conventional energy intensity indicators cannot simultaneously account for capital, labor, economic output, and environmental damages.

This study measures the total-factor energy efficiency of 31 provinces of Iran in 2021. Its innovation lies in combining the SBM model under the assumption of variable returns to scale with a three-level cross-frontier approach and an undesirable output based on the social costs of CO₂, CH₄, and N₂O. This framework decomposes overall inefficiency into managerial, climatic-regional, and technological-structural components and estimates the technical potential for energy savings.

Methodology

Each province is considered a decision-making unit. Provincial capital stock, employed labor, and final energy consumption measured in barrels of oil equivalent are the three inputs of the model. Gross provincial product is considered the desirable output, while the aggregate social cost of greenhouse gas emissions is considered the undesirable output. Energy consumption includes natural gas, gasoline, kerosene, gas oil, fuel oil, liquefied petroleum gas, and electricity. To avoid double counting, fuel consumed in power plants is deducted, and final electricity consumption is entered into the model separately. Energy carriers are converted into barrels of oil equivalent using the conversion factors reported by bp (2022).

Since official data on capital stock at the provincial level are not available, the national capital stock of each economic sector is distributed among the provinces in proportion to each province's share of the value added of that sector. This operational allocation assumes a common output elasticity with respect to capital and a common rental rate of capital within each sector, but it does not imply an assumption of identical technologies or efficiency levels across provinces.

Provincial greenhouse gas emissions are estimated using fuel-specific coefficients derived from national fuel consumption and emissions data. Emissions are valued based on the U.S. Environmental Protection Agency's global estimates of the social cost of greenhouse gases for 2021: US\$197 per metric ton of CO₂, US\$1,723 per metric ton of CH₄, and US\$55,364 per metric ton of N₂O, expressed in constant 2020 U.S. dollars and using a 2% discount rate (U.S. Environmental Protection Agency, 2023). The resulting values are aggregated into a single undesirable output. These coefficients merely provide a common monetary scale, while differences in provincial efficiency are determined independently of these coefficients and based on provincial data from Iran.

The SBM-VRS model (Tone, 2001) measures input excesses, desirable-output shortfalls, and undesirable-output excesses in a non-radial manner. In addition, the Super-SBM model (Tone, 2002) is used to rank efficient provinces. Following O'Donnell et al. (2008) and Feng et al. (2018), the provinces are classified into six groups formed by combining three climatic operational categories and two predominant economic structures, namely industry-oriented and service-oriented.

Efficiency relative to the climatic-sectoral frontier (TFEE_r), the sectoral frontier (TFEE_i), and the national cross-frontier (TFEE_m) is estimated. Overall inefficiency is decomposed into managerial inefficiency (MI=1-TFEE_r), climatic-regional heterogeneity (RHI=TFEE_r-TFEE_i), and technological-structural heterogeneity (IHI=TFEE_i-TFEE_m). Differences among the groups are examined using the Kruskal-Wallis test, and the robustness of the results is assessed using an alternative binary climatic classification.

Results and Discussion

The average efficiency declines from 0.926 under the climatic-sectoral frontier to 0.742 under the sectoral frontier and 0.460 under the national cross-frontier. This decline indicates that the distance of provinces from the best national performance cannot be explained solely by managerial performance. Seven provinces—Ilam, Bushehr, Tehran, South Khorasan, North Khorasan, Khuzestan, and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad—are efficient at all three levels. Since data envelopment analysis measures relative performance, being located on the efficiency frontier does not necessarily imply low absolute energy consumption or low emissions.

The results of the Super-SBM model place Khuzestan, Bushehr, and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad at the top of the efficient provinces. The performance of these provinces is largely associated with the high value added of upstream oil and gas activities. North Khorasan and South Khorasan combine non-oil production with relatively low energy consumption and low emission costs, while Tehran benefits from the high value added of service- and technology-related activities. These differences confirm that benchmarking and policy design should take provincial economic structures into account.

Among the 24 inefficient provinces, technological-structural inefficiency is the dominant component in 13 provinces, climatic-regional inefficiency in eight provinces, and managerial inefficiency in three provinces. After weighting these components according to actual energy consumption, the national technical energy-saving potential is estimated at approximately 885.5 million barrels of oil equivalent. The share of managerial inefficiency is 115.1 million barrels of oil equivalent (13.0 percent), the share of the climatic-regional component is 410.1 million barrels (46.3 percent), and the share of the technological-structural component is 360.3 million barrels (40.7 percent). Therefore, approximately 87 percent of this potential is associated with gaps between regional and national frontiers. The climatic-regional share represents a comparative gap between frontiers and should not be interpreted as a causal effect of climate.

The Kruskal–Wallis test indicates statistically significant group differences for the RTGR, ITGR, TFEE_i, IHI, and RHI indices, whereas these differences are not significant for TFEE_r, TFEE_m, and MI. The robustness analysis yields the same national average efficiency of 0.460, the same seven efficient provinces, and a difference of less than one percent in the total energy-saving potential. The rank correlation coefficient between the two climatic classifications is 0.996, although the precise shares of managerial and climatic-regional inefficiency remain sensitive to how the groups are defined.

Therefore, policy measures should differ across provinces. Managerial improvements should be prioritized in Zanjan, Kerman, and Hormozgan. In Isfahan, Razavi Khorasan, East Azerbaijan, Markazi, and Alborz, attention should be given to regional and infrastructural constraints, while technological upgrading is more important in Yazd, Fars, Mazandaran, Golestan, and Lorestan. In terms of absolute energy-saving potential, Isfahan, Razavi Khorasan, Fars, Yazd, and Kerman should be prioritized for further examination.

Overall, energy policy should combine demand management, infrastructure tailored to the characteristics of each region, technological modernization, and structural upgrading. Since the present analysis is cross-sectional and data envelopment analysis measures relative performance, the estimated savings represent the technical potential for 2021 and should not automatically be interpreted as achievable annual reductions.



ارزیابی کارایی انرژی استانی با در نظر گرفتن هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای: رویکرد فرامرزی سه سطحی در ایران

سید حمیدرضا ذاکری^۱، سجاد فرجی دیزجی^۲✉، عباس عساری آرانی^۳، حسین صادقی سقدل^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه توسعه و برنامه ریزی اقتصادی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: h_zakeri@modares.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه توسعه و برنامه ریزی اقتصادی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: s_dizaji@modares.ac.ir
۳. دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: assari_a@modares.ac.ir
۴. دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: sadeghih@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱ JEL: Q52, R11, D24, C61. واژه‌های کلیدی: کارایی انرژی کل عوامل، SBM-VRS، SUPER-SBM، مدل فرامرزی سه سطحی مبتنی بر SBM، هزینه اجتماعی انتشار گازهای گلخانه‌ای.	این پژوهش با هدف سنجش کارایی انرژی و تفکیک منابع ناکارایی در ۳۱ استان ایران طی سال ۱۴۰۰، چارچوب فرامرزی سه سطحی مبتنی بر مدل SBM-VRS را به کار می‌گیرد. در مدل، موجودی سرمایه، نیروی کار و مصرف انرژی بر حسب بشکه معادل نفت خام به عنوان نهاده، تولید ناخالص استانی به عنوان ستاده مطلوب و هزینه اجتماعی انتشار دی اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن به عنوان ستاده نامطلوب وارد شده‌اند. کارایی استان‌ها در سه سطح مرز اقلیم-بخش اقتصادی، مرز بخش اقتصادی و فرامرزی ملی محاسبه و ناکارایی کل به مؤلفه‌های مدیریتی، اقلیمی-منطقه‌ای و فناورانه-ساختاری تفکیک شد. نتایج نشان می‌دهد میانگین کارایی انرژی با گسترش مجموعه مرجع، از ۰.۹۲۶ در سطح اقلیم-بخش اقتصادی به ۰.۷۴۲ در سطح بخش اقتصادی و ۰.۴۶ در سطح فرامرزی ملی کاهش می‌یابد. تنها هفت استان ایلام، بوشهر، تهران، خراسان جنوبی، خراسان شمالی، خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد در هر سه سطح کارا هستند. ظرفیت فنی صرفه جویی انرژی در سطح کشور در سال ۱۴۰۰ حدود ۸۸۵.۵ میلیون بشکه معادل نفت خام برآورد شد که ۱۳ درصد آن به ناکارایی مدیریتی، ۴۶.۳ درصد به مؤلفه اقلیمی-منطقه‌ای و ۴۰.۷ درصد به مؤلفه فناورانه-ساختاری مربوط است. بنابراین، بخش عمده ظرفیت بهبود کارایی به فاصله میان مرزهای منطقه‌ای و فناورانه مربوط می‌شود و سیاست گذاری یکسان برای همه استان‌ها مناسب نیست. ارتقای کارایی انرژی مستلزم ترکیبی از بهبود مدیریت مصرف، توسعه زیرساخت‌های متناسب با شرایط منطقه‌ای و نوسازی فناوری و ساختار تولید است.

استناد: ذاکری، سید حمیدرضا، فرجی دیزجی، سجاد، عساری آرانی، عباس و صادقی سقدل، حسین (۱۴۰۵). ارزیابی کارایی انرژی استانی با در نظر گرفتن هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای: رویکرد فرامرزی سه سطحی در ایران. *نظریه های کاربردی اقتصاد*، ۱۳(۳)، ۸۱-۱۱۲.

DOI: 10.22034/eoaj.2026.70352.3479

حق مؤلف © نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز



۱- مقدمه

اقتصاد ایران به‌عنوان یکی از اقتصادهای متکی به منابع هیدروکربنی، با شدت بالای مصرف انرژی و ساختار یارانه‌ای گسترده در بخش انرژی شناخته می‌شود (میرزایی و بکری^۱، ۲۰۱۷). قیمت‌های نسبی پایین حامل‌های انرژی، رشد تقاضای داخلی و وابستگی بخش‌های تولیدی به انرژی ارزان موجب شده است شدت انرژی در ایران در مقایسه با بسیاری از کشورها در سطح بالایی قرار گیرد (شفیع‌پور و اردستانی^۲، ۲۰۰۷؛ بلالی و همکاران^۳، ۲۰۲۳). در چنین شرایطی، صرف افزایش عرضه انرژی نمی‌تواند راه حلی پایدار برای پاسخ‌گویی به رشد مصرف باشد؛ از این‌رو، شناسایی و کاهش عوامل ناکارایی و ارتقای کارایی انرژی، راهبردی ضروری برای کاهش مصرف غیرضروری، افزایش بهره‌وری تولید، کاهش فشار بر منابع انرژی و محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود.

اولین گام، شناسایی منابع ناکارایی انرژی می‌باشد، با این حال، استان‌های ایران از نظر شرایط اقلیمی، ساختار اقتصادی، سطح صنعتی‌شدن و الگوی مصرف انرژی تفاوت‌های قابل توجهی دارند. شرایط اقلیمی از طریق نیازهای سرمایه‌ی و گرمایشی و ساختار اقتصادی از طریق نوع فعالیت‌های تولیدی و شدت مصرف انرژی، بر عملکرد انرژی استان‌ها اثر می‌گذارند. از این‌رو، ارزیابی همه استان‌ها بر اساس یک مرز فناوری مشترک ممکن است تفاوت‌های طبیعی و ساختاری را به اشتباه به ناکارایی مدیریتی نسبت دهد.

بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که چه میزان از ناکارایی انرژی استان‌ها به ضعف مدیریتی و چه میزان به ناهمگنی‌های اقلیمی و شکاف‌های فناورانه و ساختاری مربوط است. برای پاسخ به این مسئله، کارایی انرژی ۳۱ استان ایران در سال ۱۴۰۰ در چارچوب فرامرزی سه‌سطحی ارزیابی می‌شود.

۲- ادبیات تحقیق

۲-۱- مفهوم کارایی انرژی و ضرورت تحلیل منطقه‌ای

کارایی انرژی بیانگر توانایی یک واحد تولیدی یا منطقه در ایجاد سطح معینی از کالاها و خدمات با مصرف انرژی کمتر است. شاخص شدت انرژی، یعنی نسبت مصرف انرژی به تولید، اگرچه تصویری اولیه از وضعیت مصرف ارائه می‌دهد، اما نمی‌تواند آثار سرمایه، نیروی کار، ساختار تولید و پیامدهای زیست‌محیطی را به‌طور هم‌زمان منعکس نماید. از این‌رو، در مطالعات جدید از مفهوم کارایی انرژی کل عوامل استفاده می‌شود که در آن، مصرف بهینه انرژی با توجه به مجموعه نهاده‌ها، تولید مطلوب و خروجی‌های نامطلوب تعیین می‌شود. در این چارچوب، یک استان زمانی از کارایی انرژی بیشتری برخوردار است که ضمن استفاده کمتر از انرژی و سایر نهاده‌ها، تولید اقتصادی بیشتری ایجاد کرده و پیامدهای زیست‌محیطی کمتری به همراه داشته باشد.

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که کارایی انرژی میان کشورها، مناطق و استان‌ها یکسان نیست و عواملی مانند ساختار اقتصادی، ترکیب فعالیت‌های تولیدی، دسترسی به فناوری، منابع انرژی و شرایط محیطی در شکل‌گیری این تفاوت‌ها

^۱ Mirzaei & Bekri^۲ Shafie-Pour & Ardestani^۳ Balali et al.

نقش دارند (وانگ و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ یو و همکاران^۲، ۲۰۱۹؛ تیان و همکاران^۳، ۲۰۲۴). این ناهمگنی در ایران اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا استان‌ها از نظر اقلیم، سطح صنعتی‌شدن، سهم بخش خدمات، تمرکز صنایع انرژی‌بر و الگوی مصرف حامل‌های انرژی تفاوت‌های قابل توجهی دارند. بنابراین، ارزیابی همه استان‌ها بر اساس یک مرز فناوری مشترک ممکن است بخشی از تفاوت‌های طبیعی و ساختاری را به اشتباه به ضعف عملکرد یا ناکارایی مدیریتی نسبت دهد.

۲-۲- تحلیل پوششی داده‌ها و مدل $SBM-VRS^4$

تحلیل پوششی داده‌ها روشی غیرپارامتریک برای سنجش کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیرنده دارای چند نهاده و چند ستاده است. مدل CCR با فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس توسط چارنس و همکاران^۵ (۱۹۷۸) و مدل BCC با فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس توسط بنکر و همکاران^۶ (۱۹۸۴) ارائه شدند. مدل‌های کلاسیک تحلیل پوششی داده‌ها عمدتاً ماهیتی شعاعی دارند و بهبود عملکرد را بر اساس کاهش یا افزایش متناسب متغیرها اندازه‌گیری می‌کنند؛ در نتیجه، ممکن است مازاد برخی نهاده‌ها یا کمبود بعضی ستاده‌ها را به‌طور کامل در شاخص کارایی منعکس نکنند. تون^۷ (۲۰۰۱) برای رفع این محدودیت، مدل اندازه‌گیری مبتنی بر مازاد یا SBM را معرفی کرد. این مدل غیرشعاعی، مازاد هر نهاده و کمبود هر ستاده را مستقیماً در محاسبه کارایی وارد می‌کند و به تغییر متناسب همه متغیرها محدود نیست. شاخص SBM نسبت به واحد اندازه‌گیری ناورداست و با افزایش مازاد نهاده‌ها یا کمبود ستاده‌ها کاهش می‌یابد؛ از این‌رو، برای تحلیل فرایندهایی که دارای چندین منشأ ناکارایی هستند مناسب است.

در ارزیابی‌های انرژی و محیط‌زیست، علاوه بر ستاده مطلوب، ستاده‌های نامطلوبی مانند انتشار آلاینده‌ها نیز وجود دارند. بهبود عملکرد در این شرایط باید با افزایش تولید مطلوب و کاهش ستاده نامطلوب همراه باشد. سیفورد و ژو^۸ (۲۰۰۲) نشان دادند که رفتار ستاده‌های مطلوب و نامطلوب باید در مدل تحلیل پوششی داده‌ها به‌صورت متفاوت تعریف شود و تلقی ساده ستاده نامطلوب به‌عنوان نهاده، لزوماً ساختار واقعی فناوری تولید را منعکس نمی‌کند. تون^۹ (۲۰۰۴) نیز مدل SBM را برای حضور هم‌زمان ستاده‌های مطلوب و نامطلوب توسعه داد؛ به‌گونه‌ای که ناکارایی از طریق کاهش مازاد نهاده‌ها، افزایش ستاده مطلوب و کاهش ستاده نامطلوب اندازه‌گیری شود.

انتخاب فرض بازده نسبت به مقیاس نیز بر نتایج کارایی اثرگذار است. استان‌های ایران از نظر جمعیت، اندازه اقتصاد، موجودی سرمایه و ساختار تولید هم‌اندازه نیستند؛ بنابراین، فرض بازده ثابت نسبت به مقیاس ممکن است اثر مقیاس فعالیت را با ناکارایی فنی درآمیزد. بر همین اساس، در پژوهش حاضر مدل $SBM-VRS$ به‌عنوان مشخصات اصلی انتخاب می‌شود تا کارایی فنی استان‌ها نسبت به مرزی با بازده متغیر سنجیده شود. البته استفاده از VRS به‌تنهایی به معنای محاسبه کارایی مقیاس نیست و سنجش مستقل آن مستلزم مقایسه نتایج مدل‌های CRS و VRS است.

¹ Wang et al.

² Yu et al.

³ Tian et al.

⁴ VRS = Variable Returns to Scale

⁵ Charnes et al.

⁶ Banker et al.

⁷ Tone

⁸ Seiford & Zhu

⁹ Tone

۲-۳- رتبه‌بندی با مدل Super-SBM و مبانی حل مدل

در مدل پایه SBM، تمامی واحدهایی که فاقد مازاد نهاده و کمبود ستاده‌اند، امتیاز یک دریافت می‌کنند؛ بنابراین، امکان تمایز و رتبه‌بندی میان واحدهای کارا وجود ندارد. مدل‌های فوق‌کارایی با حذف موقت واحد مورد ارزیابی از مجموعه مرجع، فاصله آن واحد را نسبت به مرزی که توسط سایر واحدها تشکیل شده است اندازه‌گیری می‌کنند. تون^۱ (۲۰۰۲) این رویکرد را در قالب مدل غیرشعاعی Super-SBM توسعه داد. در این مدل، واحدهای کارا می‌توانند امتیازی بیشتر از یک کسب کنند و بر اساس میزان فاصله آنها از مرز تشکیل‌شده توسط سایر واحدها رتبه‌بندی شوند. کاربرد Super-SBM در مطالعات انرژی، امکان شناسایی استان‌های مرجع و تفکیک واحدهایی را فراهم می‌کند که در مدل پایه همگی کارا تشخیص داده شده‌اند. باین‌حال، امتیاز Super-SBM صرفاً بیانگر برتری نسبی یک واحد در نمونه مورد بررسی است و نباید به‌عنوان اثبات برتری مطلق یا رابطه علی میان ویژگی‌های استان و عملکرد آن تفسیر شود.

۲-۴- چارچوب فرامرزی و نقش آن در تفکیک ناکارایی

مدل‌های متعارف تحلیل پوششی داده‌ها معمولاً فرض می‌کنند تمامی واحدها به مجموعه فرصت‌های تولیدی یکسانی دسترسی دارند. این فرض زمانی محدودکننده است که واحدها تحت شرایط محیطی، زیرساختی یا فناوری متفاوت فعالیت کنند. در چنین شرایطی، امتیازهای کارایی محاسبه‌شده نسبت به مرزهای گروهی متفاوت، مستقیماً قابل مقایسه نیستند.

باتیس و همکاران^۲ (۲۰۰۴) یک مدل فرامرزی پارامتریک ارائه کردند که در آن، مرز فراگیر، مرزهای گروه‌هایی را که تحت فناوری‌های متفاوت فعالیت می‌کنند دربر می‌گیرد. این چارچوب امکان محاسبه کارایی‌های قابل مقایسه و نسبت شکاف فناوری هر گروه نسبت به فناوری بالقوه کل را فراهم می‌کند. کاربرد تجربی اولیه این مدل نیز به بنگاه‌های تولید پوشاک در مناطق مختلف اندونزی مربوط بود.

اودانل و همکاران^۳ (۲۰۰۸) چارچوب فرامرزی را گسترش داده و نشان دادند که مرزهای گروهی و فرامرزی را می‌توان با روش‌های پارامتریک و غیرپارامتریک، از جمله تحلیل پوششی داده‌ها، برآورد کرد. در این چارچوب، عملکرد هر واحد به دو جزء اصلی تفکیک می‌شود: نخست، فاصله واحد از مرز فناوری گروه خود که بیانگر کارایی فنی درون‌گروهی است؛ و دوم، فاصله مرز گروه تا فرامرزی که شکاف فناوری یا محدودیت‌های محیط تولید را نشان می‌دهد.

مطالعات بعدی از این رویکرد برای بررسی ناهمگنی‌های منطقه‌ای و بخشی استفاده کرده‌اند. یو و همکاران (۲۰۱۹) ناهمگنی منطقه‌ای کارایی انرژی چین را با ترکیب فرامرزی و Super-SBM بررسی کردند. فنگ و همکاران^۴ (۲۰۱۸) از ساختار سلسله‌مراتبی مرزها برای تجزیه کارایی منطقه‌ای انرژی بهره گرفتند. چن و همکاران^۵ (۲۰۲۱) ناهمگنی صنعتی و منطقه‌ای را به‌طور هم‌زمان در ارزیابی کارایی انرژی صنایع تولیدی چین لحاظ کردند و تیان و همکاران (۲۰۲۴) کارایی سبز انرژی را در چارچوب ناهمگنی چندبعدی تجزیه نمودند.

¹ Tone

² Battese et al.

³ O'Donnell et al.

⁴ Feng et al.

⁵ Chen et al.

بر پایه این ادبیات، پژوهش حاضر ساختاری سه سطحی متناسب با ویژگی‌های استان‌های ایران تعریف می‌کند. در سطح نخست، استان‌ها در گروه‌های مشابه اقلیمی-اقتصادی مقایسه می‌شوند؛ در سطح دوم، مرز بخش اقتصادی بدون تفکیک اقلیمی تشکیل می‌شود؛ و در سطح سوم، فرامرزی ملی همه استان‌ها را پوشش می‌دهد. نسبت دادن فاصله میان این مرزها به مؤلفه‌های مدیریتی، اقلیمی-منطقه‌ای و فناوری-ساختاری، طراحی پژوهش حاضر است و نباید مستقیماً به مدل عمومی باتیس یا اودانل نسبت داده شود.

۲-۵- هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای به عنوان ستاده نامطلوب

در بیشتر مطالعات کارایی زیست‌محیطی، مقدار فیزیکی انتشار CO_2 یا میزان انتشار معادل CO_2 به عنوان ستاده نامطلوب استفاده می‌شود. با این حال، گازهای گلخانه‌ای از نظر ماندگاری، قدرت گرمایشی و خسارت اقتصادی یکسان نیستند. پتانسیل گرمایش جهانی یا GWP^1 ، اثر گرمایشی هر گاز را نسبت به CO_2 مقایسه می‌کند، در حالی که هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای، ارزش پولی خسارت‌های نهایی ناشی از انتشار یک تن از هر گاز را برآورد می‌کند. بنابراین، پتانسیل گرمایش جهانی و هزینه اجتماعی دو مفهوم متفاوت‌اند و نباید به جای یکدیگر استفاده شوند. استفاده از ارزش‌گذاری پولی پیامدهای زیست‌محیطی در مطالعات کارایی نیز سابقه دارد. برای نمونه، ولدخانی و مرادی‌مطلق^۲ (۲۰۲۵) با در نظر گرفتن قیمت ۵۰ دلار به ازای هر تن انتشار CO_2 ، ناکارایی مصرف انرژی و انتشار کربن ۴۰ کشور بزرگ مصرف‌کننده انرژی را در یک مقیاس پولی مشترک ارزیابی کردند. با این حال، مطالعه آنان تنها CO_2 را به عنوان ستاده نامطلوب در نظر گرفت و از یک قیمت ثابت کربن استفاده کرد، نه هزینه اجتماعی اختصاصی چند گاز گلخانه‌ای.

گزارش آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده^۳ (۲۰۲۳)، هزینه اجتماعی جداگانه‌ای برای CO_2 ، CH_4 و N_2O با توجه به خسارت‌های اقلیمی ناشی از انتشار آنها ارائه می‌کند. استفاده از این مقادیر، امکان تبدیل آثار ناهمگون گازهای مختلف به یک مقیاس پولی مشترک را فراهم می‌سازد. در پژوهش حاضر، انتشار هر یک از سه گاز گلخانه‌ای مورد بررسی مستقیماً در هزینه اجتماعی اختصاصی همان گاز ضرب شده و سپس هزینه‌های حاصل با یکدیگر تجمیع می‌شوند؛ بنابراین، گازها ابتدا از طریق ضرایب GWP به CO_2 معادل تبدیل نمی‌شوند. این رویکرد، مقادیر فیزیکی انتشار را به ارزش پولی خسارت‌های اقلیمی تبدیل می‌کند و امکان لحاظ کردن پیامدهای زیست‌محیطی گازهای مختلف را در یک مقیاس مشترک در مدل فراهم می‌سازد.

۲-۶- مرور مطالعات پیشین و شناسایی شکاف پژوهش

در ایران، ناظمی و همکاران (۱۳۹۸) کارایی انرژی ۳۰ استان را در دوره ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۲ با استفاده از ترکیب‌های مختلف نهاده و ستاده در مدل تحلیل پوششی داده‌ها بررسی کردند. آنان مصرف انرژی، نیروی کار، سرمایه، مصرف سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر را در الگوهای مختلف به عنوان نهاده و تولید ناخالص داخلی و ارزش افزوده بخش‌های صنعت و خدمات را به عنوان ستاده وارد کردند. همچنین، برای رتبه‌بندی واحدهای کارا از روش اندرسن-پیترسن^۴ (۱۹۹۳) و برای بررسی تغییرات بهره‌وری از شاخص مالم کوئیست استفاده شد. این مطالعه ناهمگنی

¹ Global Warming Potential

² Valadkhani & Moradi-Motlagh (2025)

³ U.S. Environmental Protection Agency

⁴ Andersen & Petersen

قابل توجهی میان استان‌ها نشان داد، اما ستاده نامطلوب زیست‌محیطی و تفاوت مرزهای فناوری استان‌ها را وارد مدل نکرد.

اعظمی و اژند (۱۴۰۴) کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن استان‌های ایران را طی دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷ بررسی کردند. در این مطالعه، شاخص $ETFE$ با مدل SBM ، کارایی کربن با تابع فاصله جهت‌دار و عوامل مؤثر بر دو شاخص با مدل توبیت برآورد شد. نتایج نشان داد میانگین $ETFE^1$ و $TFCE^2$ به ترتیب ۴۳ و ۲۵ درصد بوده است. همچنین، شدت انرژی اثر منفی و نوآوری اثر مثبت و معناداری بر هر دو شاخص داشته، درحالی‌که اثر ساختار صنعتی معنادار نبوده است. با وجود جامعیت زمانی مطالعه، فقط CO_2 به عنوان ستاده نامطلوب لحاظ شد و ناهمگنی اقلیمی و فناوری استان‌ها در قالب مرزهای گروهی جداگانه تفکیک نشد.

اعظمی و همکاران^۳ (۱۳۹۷) از فرامرزی و شاخص مالم کوئیسٹ غیرشعاعی برای ارزیابی عملکرد انتشار CO_2 در صنایع تولیدی ایران استفاده کردند. این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد فرامرزی در مطالعات ایرانی سابقه دارد؛ با این حال، واحد تحلیل آن صنایع تولیدی بود و ناهمگنی اقلیمی استان‌ها، ساختار کل اقتصاد استانی و هزینه اجتماعی چند گاز گلخانه‌ای را بررسی نکرد. حسینی و استفانیک^۴ (۲۰۱۹) نیز با استفاده از مدل پویای دومرحله‌ای SBM ، عملکرد پالایشگاه‌های ایران را در حضور ستاده غیرسودآور ارزیابی کردند؛ اما به دلیل ماهیت بخشی و پالایشگاهی، نتایج آن مستقیماً جایگزین ارزیابی استانی نمی‌شود.

در مطالعات بین‌المللی، وانگ و همکاران (۲۰۲۴) کارایی کل عوامل انرژی ده کشور بزرگ مصرف‌کننده انرژی را بررسی کردند. ژائو^۵ (۲۰۲۰) با استفاده از مدل $Super-SBM$ دارای ستاده نامطلوب و مدل دوربین فضایی، کارایی اقتصادی سبز استان‌های چین را ارزیابی کرد. یو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از فرامرزی و $Super-SBM$ ، ناهمگنی منطقه‌ای کارایی انرژی چین را نشان دادند. چن و همکاران (۲۰۲۱) ناهمگنی صنعتی و منطقه‌ای را به‌طور هم‌زمان در ارزیابی صنایع تولیدی لحاظ کردند و تیان و همکاران (۲۰۲۴) نیز تجزیه کارایی سبز انرژی را در چارچوب ناهمگنی چندبعدی انجام دادند.

هوانگ و ژائو^۶ (۲۰۲۴) کارایی انتشار کربن صنعت برق استان‌های چین را طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از مدل فرامرزی DEA دارای قیود عدد صحیح بررسی کردند. آنان با به‌کارگیری نسبت شکاف فناوری نشان دادند که منشأ ناکارایی در مناطق مختلف یکسان نیست؛ به‌گونه‌ای که در برخی مناطق، ناکارایی فنی و در برخی دیگر، ناکارایی مدیریتی سهم غالب داشته است. با این حال، این مطالعه به صنعت برق چین محدود بوده و ناهمگنی اقلیمی، ساختار اقتصادی کل استان و هزینه اجتماعی چند گاز گلخانه‌ای را وارد مدل نکرده است.

بر این اساس، خلأ پژوهش حاضر در نبود مطلق مطالعات تحلیل پوششی داده‌ها یا فرامرزی نیست؛ بلکه در نبود یک چارچوب استانی برای ایران است که به‌طور هم‌زمان چهار ویژگی را ترکیب کند: نخست، سنجش غیرشعاعی کارایی انرژی با در نظر گرفتن ستاده نامطلوب؛ دوم، تفکیک سلسله‌مراتبی ناهمگنی اقلیمی و تفاوت‌های ساختار اقتصادی در

¹ Ecological Total-Factor Energy Efficiency

² Total-Factor CO_2 Emission Efficiency

³ Azami et al. (2018)

⁴ Hosseini & Stefanec

⁵ Zhao

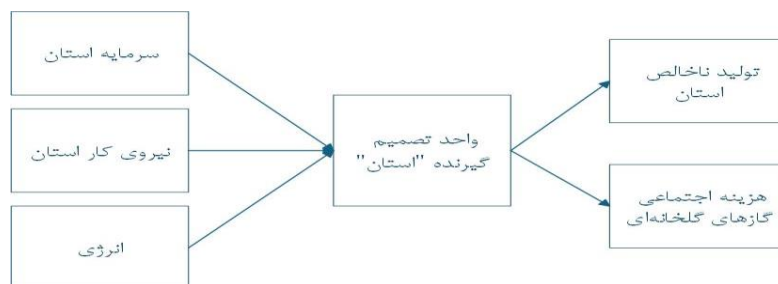
⁶ Huang & Zhao

سه سطح اقلیم-بخش اقتصادی، بخش اقتصادی و فرامرزی ملی؛ سوم، تجزیه ناکارایی به مؤلفه‌های مدیریتی، اقلیمی و فناوریانه-ساختاری؛ و چهارم، محاسبه ستاده نامطلوب تجمیعی بر مبنای هزینه اجتماعی اختصاصی هر یک از گازهای CH_4 ، CO_2 و N_2O . پژوهش حاضر با به کارگیری مدل SBM-VRS برای سنجش کارایی، مدل Super-SBM برای رتبه‌بندی واحدهای کارا و چارچوب فرامرزی سه سطحی برای ۳۱ استان ایران، درصدد پوشش این خلأ پژوهشی است.

۳- داده‌ها و روش تحقیق

۳-۱- ساختار مدل کارایی انرژی کل عوامل با لحاظ ستاده های نامطلوب

مطابق نمودار (۱)، واحدهای تحلیل در این پژوهش، استان‌های ایران در سال ۱۴۰۰ (معادل ۲۰۲۱ میلادی) هستند. در این چارچوب، انرژی، سرمایه و نیروی کار به عنوان نهاده‌ها، تولید ناخالص استانی به عنوان ستاده مطلوب و هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای به عنوان ستاده نامطلوب در نظر گرفته شده است.^۱



نمودار (۱): ساختار مدل کارایی انرژی کل عوامل با لحاظ ستاده نامطلوب

منبع: یافته‌های تحقیق

۳-۲- متغیرها و منابع داده‌ها

انرژی: ورودی انرژی هر استان شامل مجموع مصرف گاز طبیعی، بنزین، نفت سفید، نفت گاز (گازوئیل)، نفت کوره (مازوت)، گاز مایع و برق است. برای جلوگیری از دوباره شماری، مقادیر گاز طبیعی، نفت گاز و نفت کوره پس از کسر میزان سوخت مصرفی نیروگاه‌های هر استان محاسبه شده‌اند تا فقط مصرف نهایی در تمامی بخش‌ها به جز نیروگاهی در نظر گرفته شود.^۲ داده‌های مربوط به مصرف این حامل‌ها از ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰ و سالنامه آماری کشور استخراج گردیده‌اند. همچنین، برق مصرفی هر استان به طور مستقل وارد مدل شده است تا سهم واقعی مصرف نهایی برق در هر استان لحاظ گردد. از آنجا که واحد اندازه‌گیری هر حامل انرژی متفاوت است، تمامی مقادیر با استفاده از

^۱ جهت مشاهده خلاصه آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی مدل به جدول ۴ ضمیمه مراجعه شود.

^۲ برای جلوگیری از دوباره شماری، مصرف سوخت نیروگاه‌ها از کل مصرف هر حامل در استان کسر شده است. منطبق این اقدام آن است که در ورودی انرژی، هم مصرف سوخت نیروگاه‌ها و هم برق تولیدشده توسط آن نیروگاه‌ها به عنوان دو ورودی جداگانه وارد نشوند؛ زیرا برق، خود یک حامل انرژی ثانویه است که از تبدیل سوخت‌های اولیه (گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت) در نیروگاه‌ها تولید می‌شود. اگر مصرف سوخت نیروگاه‌ها کسر نشود، یک واحد انرژی اولیه، ابتدا به صورت سوخت مصرفی و سپس به صورت برق مصرفی در بخش‌های مختلف، دوبار در محاسبه‌ی ورودی انرژی یک استان محاسبه می‌شود و برآورد مصرف انرژی را به طور سیستماتیک بیش از حد واقعی نشان می‌دهد.

ضریب‌های تبدیل ارائه شده در گزارش شرکت بریتیش پترولیوم^۱ به واحد مشترک بشکه معادل نفت خام تبدیل شده‌اند^۲. این تبدیل، امکان مقایسه و تجمیع یکنواخت ورودی انرژی میان استان‌ها را فراهم می‌سازد (نمودار ۱ ضمیمه). **نیروی کار:** آمار نیروی کار استان‌ها از فایل اکسل طرح آمارگیری نیروی کار سال ۱۴۰۰ مرکز آمار ایران استخراج شده است. در این پژوهش، شاخص نیروی کار هر استان بر اساس جمع کل جمعیت فعال اقتصادی شاغل (زن و مرد) در نظر گرفته شده است؛ به این معنا که شامل تمامی افراد دارای اشتغال رسمی و غیررسمی می‌باشد. این شاخص نمایانگر میزان نیروی انسانی مشارکت‌کننده در فرآیند تولید در هر استان بوده و به‌عنوان یکی از ورودی‌های اصلی مدل تحلیل پوششی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (نمودار ۲ ضمیمه).

سرمایه استانی: مزینی (۱۳۹۸) در مقاله‌ای با عنوان «برآورد موجودی سرمایه در سطح استانی در اقتصاد ایران» بیان می‌کند که به دلیل نبود داده‌های ضروری و کامل در سطح استان‌ها از جمله سری زمانی سرمایه‌گذاری استانی، نرخ استهلاک دارایی‌ها و به ویژه آمار موجودی سرمایه در یک سال پایه، اجرای روش استاندارد و مستقیم موجودی پیوسته (PIM^۳) برای برآورد موجودی سرمایه استانی در ایران غیرممکن می‌باشد.

به دلیل نبود آمار رسمی موجودی سرمایه استانی، موجودی سرمایه ملی هر بخش متناسب با سهم ارزش افزوده همان بخش در استان‌ها تخصیص یافت. با فرض مشترک بودن کشش تولید نسبت به سرمایه و نرخ اجاره سرمایه درون هر بخش، نسبت سرمایه به ارزش افزوده ثابت بوده و موجودی سرمایه استان s در بخش b از رابطه (۱) برآورد شد. این رابطه یک فرض عملیاتی برای تخصیص سرمایه است و به معنای یکسان بودن فناوری یا کارایی استان‌ها نیست.

$$K_{s,b,t} = \left(\frac{VA_{s,b,t}}{VA_{N,b,t}} \right) K_{N,b,t} \quad (1)$$

که در آن $VA_{s,b,t}$ ارزش افزوده استان s ، $VA_{N,b,t}$ ارزش افزوده ملی، و $K_{N,b,t}$ موجودی سرمایه ملی^۴ در بخش اقتصادی b در دوره t را نشان می‌دهد. داده‌ها پس از تبدیل به قیمت ثابت، نرمال‌سازی و در مدل به عنوان ورودی سرمایه مورد استفاده قرار گرفتند (نمودار ۳ ضمیمه).

داده‌های ارزش افزوده استانی $VA_{s,b,t}$ از جداول حساب‌های منطقه‌ای مرکز آمار ایران استخراج شده‌اند که در آن ارزش افزوده رشته فعالیت‌های اقتصادی کشور به قیمت‌های ثابت سال ۱۴۰۰ هر استان به تفکیک ۱۸ بخش اقتصادی اصلی گزارش شده است.

ستاده مطلوب: برای هر استان تولید ناخالص داخلی استانی در سال ۱۴۰۰ به عنوان ستاده مطلوب در نظر گرفته شده است و اطلاعات آن از سالنامه آماری بدست آمده است.

ستاده نامطلوب: برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها دی‌اکسیدکربن را به عنوان شاخص آلودگی بررسی می‌کنند، این پژوهش با هدف ارائه تصویری جامع‌تر و واقع بینانه‌تر از پیامدهای زیست‌محیطی، هزینه اجتماعی تجمعی انتشار سه گاز گلخانه‌ای اصلی را به عنوان یک ستاده نامطلوب در مدل تحلیل پوششی داده‌ها در نظر گرفته است. این انتخاب موجب می‌شود اثر واقعی مصرف انرژی بر محیط‌زیست استان‌ها دقیق‌تر ارزیابی شود. با وجود یکسان بودن

^۱ BP. (2022). BP Statistical Review of World Energy 2022. Section "Approximate conversion factors". BP p.l.c.

^۲ برای مشاهده ضرایب تبدیل به جدول شماره ۳ ضمیمه مراجعه شود.

^۳ Perpetual Inventory Method

^۴ موجودی سرمایه خالص کل به تفکیک انواع دارایی‌ها (میلیارد ریال) به قیمت‌های ثابت سال ۱۳۹۵ - منبع بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران

واحد انتشار (تن)، اما شدت اثر گرمایی و هزینه اجتماعی آن‌ها تفاوت چشمگیری دارد. بر اساس گزارش رسمی آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده^۱، هزینه اجتماعی انتشار به ازای هر یک تن CO_2 ، CH_4 و N_2O در سال ۲۰۲۱ (معادل ۱۴۰۰) با نرخ تنزیل دو درصد به ترتیب ۱۹۷، ۱۷۲۳ و ۵۵۳۶۴ دلار برآورد شده است.^۲ این مقادیر برای تبدیل اثرات گازهای مختلف به یک مقیاس مالی مشترک استفاده شد و مجموع آن‌ها به عنوان شاخص نهایی ستاده نامطلوب در مدل‌ها لحاظ گردید تا تأثیر واقعی انتشار گازهای گلخانه‌ای بر کارایی انرژی استان‌ها در کنار عملکرد اقتصادی به صورت هم‌زمان سنجیده شود. افزون بر این، برای افزایش دقت در محاسبه هزینه‌های اجتماعی، در این پژوهش میان مصرف سوخت و مصرف خوراک گاز طبیعی در پتروشیمی‌ها تمایز قائل شده است. بر اساس دستورالعمل‌های رسمی هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (۲۰۰۶، ۲۰۱۹)^۳، در فرایندهای پتروشیمی بخش اعظم کربن موجود در خوراک در محصولات نهایی ذخیره می‌شود و تنها بخش اندکی از آن در واکنش‌های فرآیندی به دی‌اکسید کربن تبدیل می‌گردد. از این رو، برای جلوگیری از برآورد بیش‌ازحد انتشار، انتشار ناشی از مصرف خوراک گاز طبیعی در محاسبات در نظر گرفته نشده است. همچنین، بر اساس فصل‌های مرتبط با انرژی و صنایع شیمیایی، انتشار مستقیم متان و اکسید نیتروژن در مصرف خوراک پتروشیمی‌ها بسیار ناچیز بوده و عمدتاً در فرایندهای خاصی مانند احتراق ناقص، فلرینگ یا تولید اسید نیتریک رخ می‌دهد؛ از این رو هزینه اجتماعی خوراک برای این دو گاز گلخانه‌ای نیز قابل اغماض تلقی شده است.

از منظر روش‌شناسی، تمرکز بر سال پایه ۱۴۰۰ یک انتخاب هدفمند برای ارائه تصویری مقطعی و دقیق از ناترازی انرژی، شکاف‌های کارایی بین استان‌ها و برآورد پتانسیل صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار در وضعیت فعلی است؛ از این رو استفاده از آخرین سال دارای داده‌های استانی، برای تولید شواهد سیاستی در اصلاح یارانه‌ها و مدیریت تقاضا، مناسب‌تر از افزودن یک چارچوب پویای چنددوره‌ای است. افزون بر این، تحلیل کارایی تک‌ساله در چارچوب DEA رویه‌ای رایج است (اروورال و همکاران^۴ ۲۰۱۶؛ آیدین و شنل^۵ ۲۰۲۵؛ اقبال و همکاران^۶ ۲۰۲۵؛ حسین‌زاده و همکاران^۷ ۲۰۱۸). همچنین با توجه به کندی تغییرات فناوری/ترکیب سوخت در کوتاه‌مدت و همزمان شوک‌های شدید سال‌های اخیر (تحریم، اصلاحات قیمتی، نوسانات ارزی)، سری‌های زمانی بلند می‌تواند به دلیل ناهمگنی رژیم‌های سیاستی و کیفیت داده‌ها، برآورد مرز کارایی را مخدوش کند؛ بنابراین تمرکز بر یک مقطع زمانی واحد پس از شوک‌های اصلی برای مقایسه فضایی و شناسایی شکاف‌های سیاستی رویکردی قابل دفاع است.

^۱ U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances. Washington, DC: National Center for Environmental Economics, Office of Policy, Climate Change Division, Office of Air and Radiation. November 2023.

^۲ برای مشاهده نحوه محاسبه به ضمیمه مراجعه شود. همچنین جهت مشاهده روند انتشار این ۳ گاز در ایران به شکل ۲ ضمیمه مراجعه شود.

^۳ Intergovernmental Panel on Climate Change

^۴ Ervural et al.

^۵ Aydin & Şenel

^۶ Iqbal et al.

^۷ Hosseinzadeh-Bandbafha et al.

۳-۳- روش تحقیق

با توجه به تفاوت اندازه و ساختار اقتصادی استان‌ها، مدل SBM با فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس به کار گرفته شد. این مدل ضمن کنترل تفاوت مقیاس، مازاد هر نهاده و کمبود ستاده مطلوب و مازاد ستاده نامطلوب را به صورت غیرشعاعی اندازه‌گیری می‌کند.

۳-۳-۱- مدل پایه SBM-VRS

نمادگذاری و نکات: در این مطالعه کارایی n استان به عنوان واحدهای تصمیم‌گیر^۱ مورد سنجش قرار می‌گیرد. هر واحد j با استفاده از m ورودی x_{ij} به تولید s عدد ستاده مطلوب y_{rj} و q عدد ستاده نامطلوب b_{tj} می‌پردازد. در این پژوهش، مجموعه متغیرها به صورت زیر تعریف شده‌اند:

تعداد ۳۱ استان داریم: $j \in 1, \dots, 31$

ورودی‌ها: شامل سرمایه x_1 ، نیروی کار x_2 و انرژی x_3 ، لذا $m = 3$ می‌گردد؛

ستاده مطلوب: تولید ناخالص استانی y_{1j} ، لذا $s = 1$ می‌گردد،

ستاده نامطلوب: هزینه اجتماعی انتشار گازهای گلخانه‌ای^۲ b_{1j} ، در نتیجه $q = 1$ می‌گردد.

جهت پایداری مدل تمام متغیرها کاملاً مثبت در نظر گرفته شده‌اند و در مواردی که مقادیر صفر مشاهده شود، با یک مقدار بسیار کوچک $\varepsilon > 0$ جایگزین می‌گردد. برای بهبود شرایط عددی، متغیرها با استفاده از روش بیشینه‌سازی^۴ در بازه ۰ تا ۱ مقیاس‌بندی می‌شوند (پاکر^۵، ۲۰۱۵؛ افتخاری و همکاران^۶، ۲۰۱۲). فناوری تولید با فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس تعریف می‌شود و این ویژگی از طریق قید تحذب ($\sum_j \lambda_j = 1$) بر مجموعه اعمال می‌گردد.

معادله (۲) مدل SBM-VRS با ستاده‌های نامطلوب تحت بازده متغیر نسبت به مقیاس را نشان می‌دهد.

$$\min \rho_k = \frac{1 - (1/m) \sum_{i=1}^m (s_i^- / x_{ik})}{1 + (1/(s+q)) (\sum_{r=1}^s (s_r^+ / y_{rk}) + \sum_{t=1}^q (s_t^b / b_{tk}))}, \quad \rho_k \in (0, 1]$$

$$s.t.: \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{ik}, i = 1, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk}, r = 1, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j b_{tj} + s_t^b = b_{tk}, t = 1, \dots, q \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, s_i^-, s_r^+, s_t^b \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

در SBM کارایی هر واحد با اندازه‌گیری مازادها سنجیده می‌شود؛ یعنی اینکه هر واحد تا چه حد می‌تواند ورودی‌ها را کم کند (مازاد ورودی، s^-)، ستاده‌های مطلوب را زیاد کند (کمبود ستاده، s^+) و ستاده‌های نامطلوب را پایین بیاورد (مازاد ستاده نامطلوب، s^b) بی‌آنکه از فناوری موجود عبور کند. هرچه میزان این ظرفیت برای کاهش ورودی‌ها و ستاده‌های نامطلوب و در عین حال افزایش ستاده‌های مطلوب بیشتر باشد، نشان‌دهنده فاصله بیشتر واحد از مرز کارا و در نتیجه سطح پایین‌تر کارایی آن واحد تصمیم‌گیر می‌باشد.

^۱ (Decision Making Units: DMUs)

^۲ Green House Gas Cost

^۳ برای جلوگیری از خطاهای عددی و تقسیم بر صفر در محاسبات DEA، مقادیر صفر با عددی بسیار کوچک $\varepsilon = 10^{-9}$ جایگزین می‌شوند.

^۴ max-normalization

^۵ Pakkar

^۶ Eftekhary

خطی‌سازی از طریق تبدیل چارنز-کوپر^۱:

برای حل عددی مدل کسری SBM، از تبدیل چارنز-کوپر استفاده می‌کنیم تا مسئله به یک برنامه‌ریزی خطی هم‌ارز تبدیل شود. ایده اصلی این است که یک ضریب مقیاس مثبت تعریف شود که معکوس مخرج تابع هدف کسری است؛ سپس تمام متغیرها (شدت‌ها و مازادها) با همین ضریب بازمقیاس‌گذاری شوند. به‌طور خلاصه، مطابق معادله (۳) داریم:

$$t = [1 + \frac{1}{s+q} (\sum_{r=1}^s \frac{s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{t=1}^q \frac{s_t^b}{b_{tk}})]^{-1}, \Lambda_j = t\lambda_j, S_i^- = ts_i^-, S_r^+ = ts_r^+, S_t^b = ts_t^b \quad (3)$$

با جایگذاری این تبدیل در قیود و تابع هدف، مدل به فرم خطی بازنویسی می‌شود و حل آن با روش‌های استاندارد خطی ممکن می‌گردد. از نظر مفهومی، این تبدیل صرفاً یک بازمقیاس‌گذاری بی‌طرفانه روی همان مجموعه جواب‌هاست؛ بنابراین مرز کارایی و تفسیر اقتصادی تغییر نمی‌کند.

۳-۳-۲- مدل Super-SBM برای رتبه‌بندی واحدهای کارا

در مدل Super-SBM، واحد تصمیم‌گیرنده ابتدا از مجموعه مرجع حذف می‌شود تا مرز کارایی فقط بر پایه سایر واحدها شکل گیرد. سپس ستاده مطلوب در سطح مشاهده‌شده ثابت می‌ماند و تنها ورودی‌ها و ستاده‌های نامطلوب به‌صورت یکنواخت با ضریب $\tau \geq 1$ (به‌همراه مازادها) افزایش داده می‌شوند. به این ترتیب، مدل می‌آزماید آیا ترکیبی از سایر واحدها می‌تواند با نهاده کمتر و آلودگی کمتر همان سطح تولید را ایجاد کند یا خیر. اگر حتی در این شرایط نیز امتیاز واحد بزرگ‌تر از یک باشد ($\sigma_k > 1$)، واحد به‌عنوان فوق‌کارا شناخته می‌شود و برتری آن در میان واحدهای کارا تأیید می‌گردد.

$$\sigma_k = \min_{\tau, \lambda, s^-, s^+, s^b} \tau + \frac{1}{m+q} \left(\sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}} + \sum_{t=1}^q \frac{s_t^b}{b_{tk}} \right)$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} \sum_{j \neq k} \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \tau x_{ik}, & i = 1, \dots, m, \\ \sum_{j \neq k} \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk}, & r = 1, \dots, s, \\ \sum_{j \neq k} \lambda_j b_{tj} + s_t^b = \tau b_{tk}, & t = 1, \dots, q, \\ \sum_{j \neq k} \lambda_j = 1, \\ \lambda_j \geq 0, \quad s_i^- \geq 0, \quad s_r^+ \geq 0, \quad \tau \geq 1, \quad s_t^b \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

۳-۳-۳- مدل فرامرزی سه سطحی

در مدل‌های سنتی SBM، همه‌ی استان‌ها در برابر یک مرز فناوری مشترک سنجیده می‌شوند؛ در حالی که در عمل، ساختار اقتصادی و شرایط اقلیمی آن‌ها یکسان نیست (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۵؛ یه و همکاران^۲، ۲۰۲۳). این ناهمگنی، فرض همگنی واحدهای تصمیم‌گیرنده را نقض کرده و در صورت نادیده‌گرفتن، برآورد کارایی را دچار سوگیری می‌کند (یو و همکاران، ۲۰۱۹). ایران با تنوع اقلیمی گسترده (از سرد کوهستانی تا گرم و خشک) و تفاوت‌های عمیق در ساختار اقتصادی استان‌ها (صنعتی در برابر خدماتی)، نمونه‌ای بارز از این ناهمگنی است. استان‌های گرم جنوبی به‌دلیل نیاز سرمایشی، مصرف برق بالایی دارند؛ در مقابل، استان‌های سرد کوهستانی مصرف گاز طبیعی برای گرمایش را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، استان‌های صنعتی با شدت انرژی بالا و استان‌های خدماتی

¹ Charnes-Cooper transformation

² Ye et al.

با الگوی مصرف متفاوت، هر کدام مرز فناوری خاص خود را دارند. در چنین شرایطی، اعمال یک مرز واحد برای همه‌ی استان‌ها، تفاوت‌های اقلیمی و ساختاری را به‌عنوان ناکارایی تفسیر می‌کند و سیاست‌گذاری را گمراه می‌سازد. برای رفع این مسئله، پژوهش حاضر از چارچوب فرامرزی سه‌سطحی استفاده می‌کند که امکان تفکیک ناکارایی به سه مؤلفه‌ی مدیریتی، اقلیمی و فناورانه-ساختاری را فراهم می‌آورد.

در سطح نخست، هر استان تنها با استان‌هایی مقایسه می‌شود که از نظر نوع فعالیت اقتصادی (صنعتی یا خدماتی) و ویژگی اقلیمی (سرد، معتدل و گرم و خشک) مشابه هستند؛ هدف این مرحله سنجش ناکارایی مدیریتی درون‌گروهی است. در سطح دوم، همان استان در سطحی گسترده‌تر و در میان سایر استان‌های دارای بخش اقتصادی مشابه، بدون توجه به تفاوت‌های اقلیمی، ارزیابی می‌شود تا مشخص گردد چه بخشی از شکاف کارایی ناشی از تفاوت‌های اقلیمی است. در نهایت، در سطح سوم، استان نسبت به مرز ملی (فرامرزی) مقایسه می‌گردد تا تفاوت‌های فناورانه میان بخش‌های اقتصادی مختلف آشکار شود. این ساختار سلسله‌مراتبی امکان تفکیک منشأهای مختلف ناکارایی (مدیریتی، اقلیمی و فناورانه) را فراهم کرده و تصویری جامع‌تر و منصفانه‌تر از کارایی انرژی استان‌ها ارائه می‌دهد.

۳-۳-۱- معیارهای طبقه‌بندی و تشکیل گروه‌ها

برای پیاده‌سازی سطح نخست چارچوب فرامرزی، استان‌ها بر اساس دو معیار اقلیمی و اقتصادی گروه‌بندی شدند. از نظر اقلیمی، با توجه به شرایط حرارتی، موقعیت جغرافیایی و الگوی نیاز به گرمایش و سرمایش، استان‌ها در سه گروه سرد، معتدل و گرم و خشک قرار گرفتند تا ناهمگنی محیطی درون هر مجموعه مرجع کاهش یابد؛ این طبقه‌بندی صرفاً جنبه عملیاتی دارد و پهنه‌بندی اقلیمی جدیدی ارائه نمی‌کند. از نظر اقتصادی نیز استان‌ها بر مبنای بخشی با بیشترین سهم در ارزش‌افزوده استانی به دو گروه صنعت‌محور و خدمات‌محور تقسیم شدند. بخش کشاورزی به دلیل کاهش تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده و تضعیف قدرت تفکیک مدل، به‌صورت گروه مستقل در نظر گرفته نشد. در نتیجه، از ترکیب این دو معیار، شش گروه اقلیم-بخش اقتصادی تشکیل شد که تفکیک کامل استان‌ها در جدول (۱) ضمیمه گزارش شده است.

۳-۳-۲- تجزیه کارایی انرژی در چارچوب فرامرزی

در این گام، نتایج مدل SBM به زبان انرژی و بر حسب معادل بشکه نفت خام باز تعبیر می‌شود. برای هر استان، مؤلفه مازاد ورودی انرژی که در سه سطح متوالی (اقلیم-بخش اقتصادی، بخش اقتصادی و فرامرزی ملی) به دست می‌آید، به‌ترتیب با ΔE_r ، ΔE_i و ΔE_m نمایش داده می‌شود. این مقادیر، مازادهای اصلی بازیابی‌شده از رابطه $s = S/t$ هستند که پس از رفع نرمال‌سازی به واحد واقعی بشکه معادل نفت خام تبدیل شده‌اند.^۱ بر اساس این مقادیر، کارایی کل عامل انرژی در هر مرز به صورت نسبت انرژی کارآ به مصرف واقعی تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned}TFEE_r &= (E_k - \Delta E_r)/E_k \\TFEE_i &= (E_k - \Delta E_r - \Delta E_i)/E_k \\TFEE_m &= (E_k - \Delta E_r - \Delta E_i - \Delta E_m)/E_k\end{aligned}\quad (5)$$

در معادلات (۵) E_k نشان دهنده مصرف واقعی انرژی هر استان است و ΔE مقدار انرژی مصرفی اضافی یا میزان صرفه جویی بالقوه‌ی انرژی است که مدل در هر سطح (اقلیم-بخش اقتصادی، بخش اقتصادی و یا ملی) تشخیص داده است.

^۱ پس از حل فرم خطی‌شده چارن-کوپر، مازاد اصلی انرژی از رابطه $S_{E,k}^- = S_{E,k}/t$ بازیابی شد. سپس با رفع نرمال‌سازی، صرفه‌جویی بالقوه انرژی هر استان از رابطه $\Delta E_k = S_{E,k}^- \times E_{\max}$ بر حسب بشکه معادل نفت خام محاسبه گردید.

به این ترتیب، $TFEE_m$ نشان‌دهنده کارایی نهایی نسبت به فرامرزی ملی است و مشخص می‌کند چه سهمی از مصرف فعلی انرژی (بر حسب بشکه نفت خام) پس از حذف تمام ناکارایی‌ها باقی می‌ماند. همچنین، برای ارزیابی کاهش کارایی هنگام گسترش مجموعه مرجع، نسبت‌های شکاف فناوری به صورت معادلات (۶) تعریف می‌شوند:

$$RTGR^1 = \frac{TFEE_i}{TFEE_r}, ITGR^2 = \frac{TFEE_m}{TFEE_i} \quad (۶)$$

که شدت تفاوت فناوری بین مرزها را نشان می‌دهند.

با توجه به این‌که در پژوهش حاضر ۳ ورودی و ۲ خروجی به کار رفته است، نمایش دقیق روابط نیازمند فضایی پنج بعدی است و درک شهودی آن دشوار می‌باشد. از این رو در نمودار (۲) یک نمایش دوبعدی مفهومی ترسیم شده که نقش هر یک از مرزها را بر محور انرژی (افقی) در سطح خروجی ثابت $\bar{Y}$ نشان می‌دهد (برای نمونه با ۲ اقلیم و ۲ بخش صنعت و خدمات) (چن و همکاران، ۲۰۲۱؛ تیان و همکاران، ۲۰۲۴).

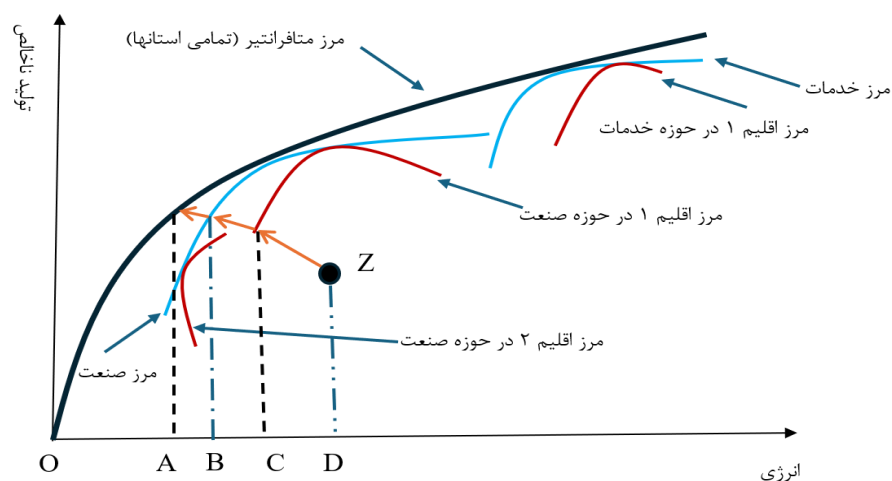
در این شکل، یک واحد تصمیم‌گیرنده فرضی در نقطه Z نشان داده شده است، مصرف مشاهده شده انرژی این واحد با D مشخص شده است و سه هدف کارا به ترتیب عبارت‌اند از C متناظر با مرز اقلیم-بخش اقتصادی (رنگ قرمز)، B متناظر با مرز بخش اقتصادی (رنگ آبی) و A متناظر با مرز فرامرزی (رنگ مشکی) ترسیم شده است.

به این ترتیب، شاخص‌های کارایی انرژی ($TFEE$) در سه مرز مقایسه به صورت معادلات (۷) تعریف می‌شوند:

$$TFEE_r = \frac{C}{D}, TFEE_i = \frac{B}{D}, TFEE_m = \frac{A}{D} \quad (۷)$$

که طبعاً نتیجه به صورت معادله (۸) خواهد بود:

$$D \geq C \geq B \geq A \Rightarrow TFEE_r \geq TFEE_i \geq TFEE_m \quad (۸)$$



نمودار (۲): نمایش شماتیک فرامرزی سه‌سطحی

منبع: یافته‌های تحقیق

همچنین ناکارایی انرژی در سطح فرامرزی به صورت $EI = 1 - TFEE_m$ تعریف می‌گردد. به عبارت دیگر، EI نشان می‌دهد چه نسبتی از مصرف فعلی انرژی می‌تواند در صورت حرکت از وضعیت موجود تا مرز کارا صرفه‌جویی شود. بر

¹ Regional Technology Gap Ratio

² Inter-sector Technology Gap Ratio

این اساس، کل صرفه‌جویی بالقوه‌ی انرژی برابر با این ناکارایی است و در ادامه، با استفاده از روابط جدول (۱)، به سه جزء مدیریتی، اقلیمی و فناورانه-ساختاری تفکیک می‌گردد.

جدول (۱): تجزیه صرفه‌جویی بالقوه‌ی انرژی

فرمول	توضیح
$\Delta E_r = D - C$ $MP = \Delta E_r$	صرفه‌جویی بالقوه‌ی انرژی که در صورت بهبود مدیریت استانی و بهره‌وری منابع، در چارچوب فناوری اقلیم-بخش اقتصادی موجود (گذار از D به C) قابل تحقق است؛ این مقدار به‌عنوان پتانسیل مدیریتی (MP) تفسیر می‌شود.
$REP = \Delta E_i$ $\Delta E_i = C - B$	صرفه‌جویی بالقوه‌ی انرژی با حذف ناهمگنی‌های اقلیمی و هم‌تراز شدن استان با بهترین استان‌های هم‌بخش اقتصادی در سطح ملی (گذار از C به B)؛ این مقدار پتانسیل همسان‌سازی اقلیمی (REP) را نشان می‌دهد.
$\Delta E_m = B - A$ $IEP = \Delta E_m$	صرفه‌جویی بالقوه‌ی انرژی ناشی از ارتقای فناوری و ساختار تولید از مرز بخش اقتصادی به فرامرزی ملی (گذار از B به A)؛ این مقدار پتانسیل همگرایی فناوری ملی (IEP) را بازتاب می‌دهد.
$EP_{total} = MP + REP + IEP = D - A$	صرفه‌جویی بالقوه‌ی کل انرژی از وضعیت فعلی (D) تا فرامرزی ملی (A) که برابر با مجموع سه جزء مدیریتی، منطقه‌ای و فناورانه است.

منبع: یافته‌های تحقیق

بر این اساس، شاخص‌های ناکارایی کل انرژی به صورت بی بعد و در بازه صفر تا یک به سه جزء نسبی تجزیه می‌شود؛ این مؤلفه‌ها (که نسبت مازاد مصرف انرژی به مصرف مشاهده شده را نشان می‌دهند) به ترتیب به صورت معادلات (۹) تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 {}^1MI &= \frac{\Delta E_r}{D} = 1 - TFEE_r \\
 {}^2RHI &= \frac{\Delta E_i}{D} = TFEE_r - TFEE_i \\
 {}^3IHI &= \frac{\Delta E_m}{D} = TFEE_i - TFEE_m
 \end{aligned}
 \quad (9)$$

که به ترتیب (MI) بیانگر سهم ناکارایی مدیریتی، (RHI) سهم ناکارایی ناشی از ناهمگنی‌های اقلیمی و مکانی درون بخشی اقتصادی و (IHI) سهم ناکارایی فناورانه و ساختاری نسبت به فرامرزی هستند؛ به‌این ترتیب، ناکارایی کل انرژی در سطح فرامرزی به‌صورت معادله (۱۰) بدست می‌آید:

$$EI = 1 - TFEE_m = MI + RHI + IHI \quad (10)$$

در این پژوهش از نرم افزار پایتون با بسته PuLP و حل گر CBC استفاده شده است.

۳-۳-۳- روش بررسی همگنی درون گروهی و ناهمگنی بین گروهی

همگنی درون گروهی از طریق استفاده‌ی هم‌زمان از دو معیار اقلیمی و اقتصادی تقویت می‌شود. معیار اقلیمی شرایط مؤثر بر نیاز سرمایشی، گرمایشی و شدت مصرف سوخت را تا حدی یکسان‌سازی می‌کند؛ در حالی که معیار بخش غالب

¹ Managerial Inefficiency

² Regional Heterogeneity Inefficiency

³ Inter-technology (or Inter-sectoral) Heterogeneity Inefficiency

اقتصادی، تفاوت‌های مربوط به ساختار تولید، ترکیب فعالیت‌ها و فناوری غالب را کنترل می‌نماید (فنگ و همکاران^۱، ۲۰۱۸؛ ژانگ و چوی^۲، ۲۰۱۳). این رویکرد موجب کاهش تورش ناشی از تفاوت‌های طبیعی، محیطی و ساختاری شده و مقایسه‌ای منصفانه‌تر میان استان‌های مشابه فراهم می‌سازد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ سیف‌الهراد و حمیدی‌رضی، ۱۳۹۶).

جهت پاسخ به نگرانی مربوط به اعتبار گروه‌بندی استان‌ها، دو موضوع بررسی شد: نخست، آیا استان‌های داخل هر گروه تا حد قابل قبولی مشابه‌اند؛ و دوم، آیا بین گروه‌های مختلف تفاوت معنادار وجود دارد یا خیر. ضریب تغییرات $TFEE_r$ در گروه‌های سرد-خدمات، معتدل-خدمات، معتدل-صنعت و گرم‌وخشک-خدمات به ترتیب برابر با ۰.۰۰۴، ۰.۰۳۴، ۰.۰۷۷ و ۰.۰۸۵ است و همگنی نسبی بالایی را نشان می‌دهد. در مقابل، این ضریب در گروه‌های سرد-صنعت و گرم‌وخشک-صنعت به ترتیب ۰.۴۹۱ و ۰.۴۳۱ است؛ بنابراین، همگنی درونی این دو گروه صنعتی ضعیف‌تر است.

در ادامه، برای ارزیابی ناهمگنی بین گروهی از آزمون ناپارامتریک کروسکال-والیس^۳ استفاده شد. انتخاب این آزمون به دلیل تعداد محدود استان‌ها و مناسب بودن آن در شرایطی است که فرض نرمال بودن توزیع شاخص‌های کارایی و شکاف فناوری با اطمینان قابل‌پذیرش نیست. نتایج این آزمون در جدول (۲) ضمیمه گزارش شده است. نتایج آزمون کروسکال-والیس^۴ نشان می‌دهد تفاوت میان گروه‌های شش‌گانه برای شاخص‌های $ITGR$ ، $RTGR$ ، $TFEE_i$ ، IHI و RHI در سطح پنج درصد معنادار است. در مقابل، تفاوت $TFEE_r$ ، $TFEE_m$ و MI معنادار نیست. بنابراین، ناهمگنی اقلیمی-اقتصادی بیشتر در شکاف‌های فناوری، کارایی بخشی و مؤلفه‌های اقلیمی و فناورانه ناکارایی مشاهده می‌شود؛ در حالی که کارایی مدیریتی و کارایی نهایی فرامرزی تفاوت روشنی میان گروه‌ها نشان نمی‌دهد.

۴- یافته‌های تحقیق

۴-۱- نتایج مدل پایه SBM-VRS

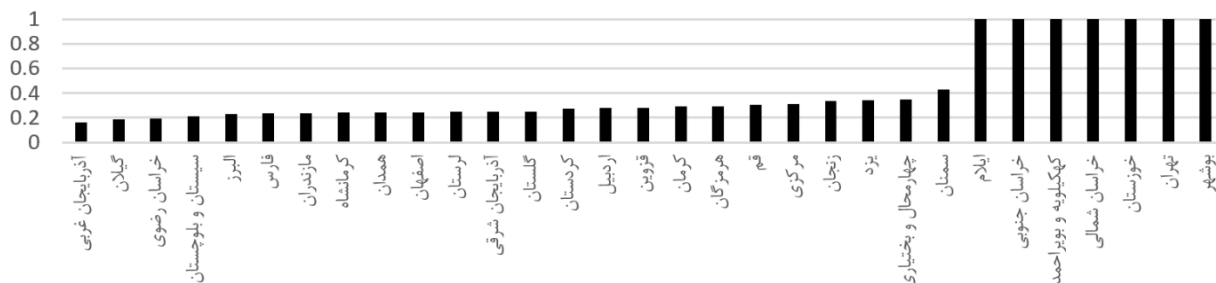
نمودار (۳) رتبه بندی کارایی انرژی استان‌های ایران در سال ۱۴۰۰ بر اساس مدل SBM-VRS را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها چند استان از جمله ایلام، خراسان جنوبی، کهگیلویه و بویراحمد، خراسان شمالی، خوزستان، تهران و بوشهر به سطح کارایی کامل (۱ یا ۱۰۰٪) دست یافته‌اند که بیانگر استفاده بهینه از نهاده‌های سرمایه، نیروی کار و انرژی در تولید ناخالص استانی است. در مقابل، بخش عمده‌ای از استان‌ها، به‌ویژه آذربایجان غربی، گیلان و خراسان رضوی، در سطوح پایین کارایی قرار دارند و نشان‌دهنده‌ی اتلاف بالای انرژی و ظرفیت بالقوه برای بهبود بهره‌وری انرژی هستند.

^۱ Feng et al.

^۲ Zhang & Choi

^۳ Kruskal-Wallis test

^۴ برای این بخش از نرم افزار stata 17 استفاده شده است

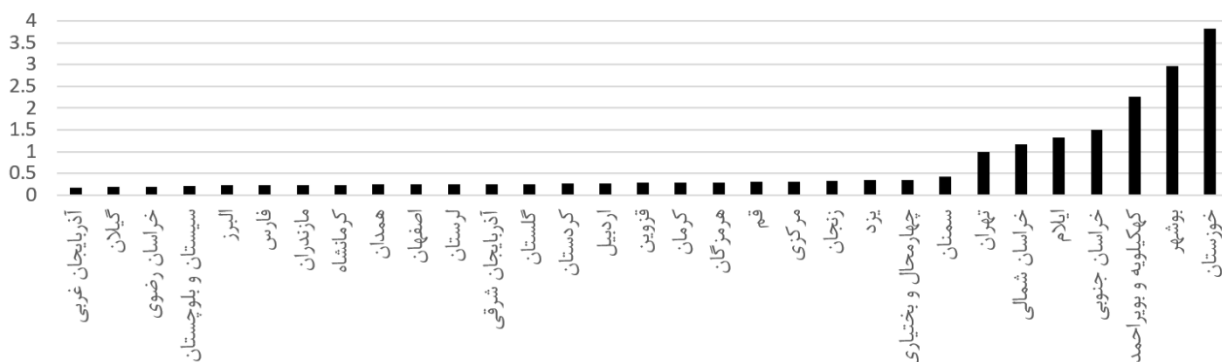


نمودار (۳): کارایی انرژی استان‌های ایران به ترتیب کارایی بر اساس مدل SBM-VRS در سال ۱۴۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-۲- نتایج مدل Super-SBM

نمودار (۴) و شکل (۱) ضمیمه رتبه بندی حاصل از برآورد مدل Super-SBM را برای استان‌های ایران در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. در مدل پایه‌ی SBM، تمامی استان‌هایی که بر روی مرز کارایی قرار می‌گیرند، امتیازی معادل واحد دریافت می‌کنند و از این رو، امکان رتبه‌بندی و تمایز میان آن‌ها وجود ندارد. مدل Super-SBM با حذف واحد مورد ارزیابی از مجموعه‌ی مرجع، این محدودیت را برطرف می‌سازد و نشان می‌دهد که حتی در میان استان‌های کارا نیز سطوح متفاوتی از شدت کارایی وجود دارد. دامنه‌ی امتیازهای به‌دست‌آمده برای استان‌های کارا، تقریباً از ۱ تا ۴ متغیر است که بیانگر تفاوت فاحش در عملکرد اقتصادی-زیست‌محیطی میان واحدهای کارا می‌باشد.



نمودار (۴): کارایی انرژی استان‌های ایران به ترتیب کارایی بر اساس مدل Super-SBM در سال ۱۴۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

بر اساس نتایج این مدل، استان‌های خوزستان، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد به ترتیب بالاترین امتیاز فوق‌کارایی^۱ را کسب کرده و در رتبه‌های برتر قرار گرفته‌اند. در سوی مقابل، استان‌های گیلان و آذربایجان غربی با پایین‌ترین امتیاز در انتهای این رتبه‌بندی جای دارند که نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی عملکردی قابل توجه آن‌ها با استان‌های مرجع است. اما پرسش کلیدی اینجاست که چه عواملی این شکاف عظیم را ایجاد کرده‌اند؟ تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که عامل

^۱ منظور از فوق کارا امتیاز یک و بالاتر می‌باشد.

تعیین کننده، صرفاً میزان مصرف انرژی نیست؛ بلکه بهره‌وری انرژی یعنی میزان ارزش افزوده‌ی اقتصادی ایجاد شده به ازای هر واحد انرژی مصرفی، نقش بنیادین در کارایی استان‌ها ایفا می‌کند. برای مستندسازی این ادعا و آشکارسازی ریشه‌های اقتصادی امتیازات فوق‌کارا، جدول (۲) ارزش افزوده‌ی حاصل از فعالیت استخراج نفت خام، گاز طبیعی و خدمات پشتیبانی معادن^۱ را برای استان‌های منتخب در سال ۱۴۰۰ ارائه می‌دهد. این داده‌ها نشان می‌دهد که منشأ اصلی برتری استان‌های فوق‌کارا، چه در استان‌هایی که مصرف انرژی بالا است (خوزستان و بوشهر) و چه در جایی که مصرف انرژی پایین است (کهگیلویه و بویراحمد و ایلام)، به حضور صنایع بالادست نفت و گاز بازمی‌گردد.

جدول (۲): ارزش افزوده حاصل از فعالیت استخراج نفت خام، گاز طبیعی و خدمات پشتیبانی معادن

ردیف	استان	ارزش افزوده (میلیون ریال)
۱	خوزستان	۱۰,۴۲۵,۹۱۳,۰۰۰
۲	بوشهر	۴,۱۲۲,۵۱۱,۵۴۲
۳	کهگیلویه و بویراحمد	۱,۱۸۸,۷۱۷,۴۴۱
۴	ایلام	۷۹۲,۷۶۴,۶۵۷
۵	تهران	۲۴,۷۹۴,۵۶۶
۶	گیلان	۰
۷	آذربایجان غربی	۰

منبع: مرکز آمار ایران، حساب‌های منطقه‌ای سال ۱۴۰۰

همان طور که در جدول (۲) مشهود است، ارزش افزوده‌ی بخش استخراج نفت و گاز در چهار استان برتر، به مراتب فراتر از سایر استان‌ها بوده و بخش عمده‌ای از تولید ناخالص استانی را تشکیل می‌دهد. این ساختار اقتصادی دو مسیر متفاوت برای دستیابی به کارایی ایجاد می‌کند: نخست، در استان‌هایی نظیر خوزستان و بوشهر، علیرغم مصرف بالای انرژی و هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار آلاینده‌ها، ارزش افزوده‌ی عظیم حاصل از صنایع نفت و گاز، نسبت ستاده مطلوب به نهاده را به سطحی بسیار بالا ارتقا داده است. دوم، در استان‌هایی همچون کهگیلویه و بویراحمد و ایلام، به دلیل ترکیب ارزش افزوده‌ی بالای بخش نفت و گاز با مصرف پایین انرژی و هزینه‌های اجتماعی کمتر، استان‌ها در زمره‌ی واحدهای فوق‌کارا قرار گرفته‌اند. در مقابل، استان‌هایی مانند گیلان و آذربایجان غربی به دلیل فقدان فعالیت‌های استخراجی، ناگزیر به اتکا بر بخش‌های کشاورزی و خدماتی با بهره‌وری انرژی پایین‌تر هستند که منجر به قرارگیری آن‌ها در انتهای رتبه‌بندی شده است.

در مقابل استان‌های نفت خیز، خراسان جنوبی و خراسان شمالی با وجود سهم صفر از استخراج نفت و گاز، به دلیل تکیه بر ترکیب بهینه‌ای از ارزش افزوده‌ی فلزات پایه و معادن غیرنفتی در کنار مصرف پایین انرژی و هزینه‌ی اجتماعی ناچیز، موفق به کسب امتیاز فوق‌کارایی شده‌اند. این الگو نشان می‌دهد که حتی در غیاب منابع هیدروکربنی، دستیابی به مرز کارایی ملی از طریق بهینه‌سازی ساختار تولید و بهره‌وری انرژی امکان‌پذیر می‌باشد.

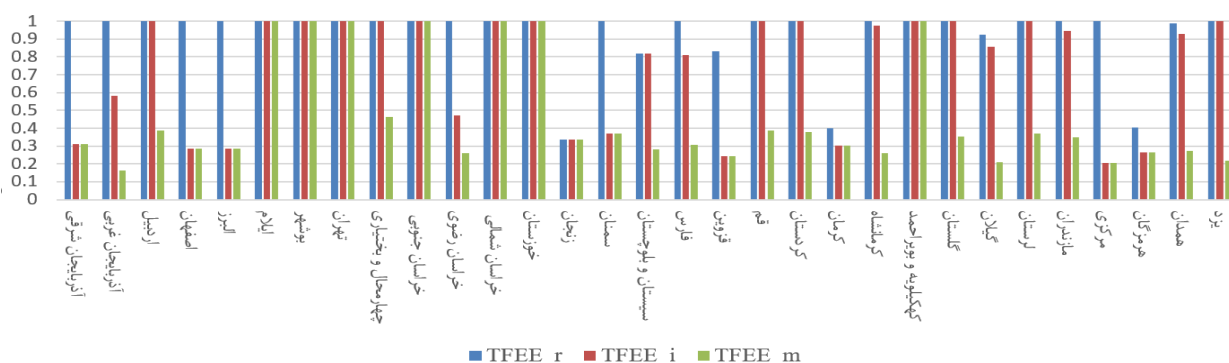
^۱ منبع: سازمان آمار-حساب‌های منطقه‌ای به قیمت‌های جاری و ثابت ۱۴۰۱ - ۱۳۹۰

در این میان، استان تهران الگوی متمایزی را ارائه می‌دهد. تهران با وجود مصرف بالای انرژی، حجم عظیم سرمایه و نیروی کار و نیز هزینه‌های اجتماعی قابل توجه ناشی از آلاینده‌گی، به دلیل سهم بسیار بالای تولید ناخالص داخلی (ناشی از بهره‌وری بالای بخش خدمات، صنایع فناورانه)، در مرز کارایی قرار گرفته است. این امر مؤید آن است که ارزش افزوده‌ی اقتصادی ایجاد شده به ازای هر واحد انرژی، سنگ بنای اصلی کارایی است و صرفاً میزان مصرف انرژی یا حجم مطلق آلاینده‌گی، به تنهایی معیارهای تعیین کننده‌ی کارایی محسوب نمی‌شوند.

این تحلیل ضمن معرفی استان‌های فوق‌کارا به عنوان الگوهای مرجع مناسب، تأکید می‌کند که فرآیند الگوبرداری باید متناسب با ساختار اقتصادی هر استان انجام پذیرد. برای نمونه، استان‌های دارای ساختار کشاورزی-خدماتی (مانند گیلان) نمی‌توانند از الگوی مصرف استان‌های نفت‌خیز (مانند خوزستان) تبعیت کنند؛ بلکه ضرورت دارد با تکیه بر ظرفیت‌های بومی خود (نظیر توسعه گردشگری پایدار، تقویت صنایع تبدیلی کشاورزی و ارتقای بهره‌وری در بخش خدمات)، مسیر متناسب با ساختار اقتصادی خویش را جهت بهبود کارایی دنبال نمایند.

۴-۳- نتایج مدل فرامرزی سه سطحی^۱

میانگین کارایی انرژی با گسترده‌تر شدن دامنه مقایسه استان‌ها، از ۰.۹۲۶ در مرز اقلیم-بخش اقتصادی به ۰.۷۴۲ در مرز بخش اقتصادی و ۰.۴۶ در فرامرزی ملی کاهش می‌یابد. همچنین، مطابق نمودار (۵)، تنها هفت استان در هر سه سطح امتیاز کارایی یک کسب کرده‌اند؛ دلایل قرارگرفتن این استان‌ها روی مرز کارایی در بخش پیشین توضیح داده شد.



نمودار (۵): مقایسه کارایی انرژی استان‌های ایران در سه سطح مرز اقلیم-بخش اقتصادی، مرز بخش اقتصادی و

فرامرزی ملی، سال ۱۴۰۰

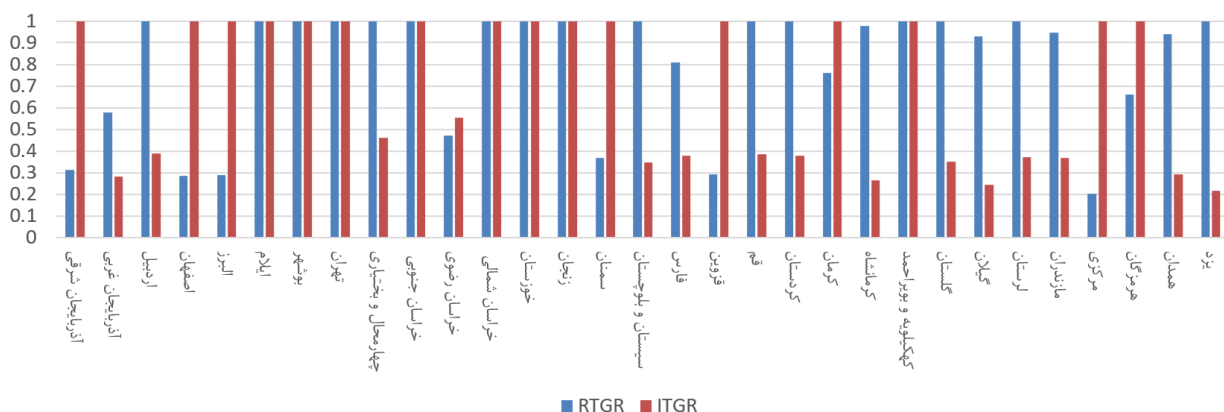
منبع: یافته‌های تحقیق

در سطح بین‌المللی نیز، الگوی به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. هوانگ و ژائو^۲ (۲۰۲۴) با به‌کارگیری مدل فرامرزی برای صنعت برق چین نشان داده‌اند که استان‌های با کارایی بالای کربنی عمدتاً شامل ترکیبی از یک اقتصاد ساحلی پیشرفته و چند استان کوچک یا منابع‌محور با اتکای بالا به انرژی‌های نو هستند؛ یعنی مجموعه‌ای از قطب‌های توسعه‌یافته با فناوری پیشرفته در کنار واحدهای کوچک‌تر اما کارا تر. از نظر مفهومی،

^۱ برای مشاهده جدول نتایج ۵ ضمیمه مراجعه گردد.

^۲ Huang & Zhao (2024)

این الگو با یافته‌های پژوهش حاضر درباره ایران مشابه است؛ به این معنا که تهران، به عنوان یک مرکز خدماتی-صنعتی پیشرفته، و چند استان کوچک‌تر و منابع‌محور در جنوب و غرب کشور، نزدیک به فرامرزی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در نمودار (۶) مشاهده می‌شود، منشأ فاصله استان‌ها از فرامرزی ملی یکسان نیست. در ۱۴ استان، پایین‌تر بودن ITGR نشان می‌دهد شکاف فناوریانه-ساختاری نقش بیشتری دارد؛ در ۹ استان، پایین‌تر بودن RTGR بیانگر اهمیت بیشتر شکاف اقلیمی-منطقه‌ای است و در ۸ استان نیز اثر دو شکاف تقریباً برابر است. بنابراین، عامل اصلی ناکارایی از استانی به استان دیگر تفاوت دارد.

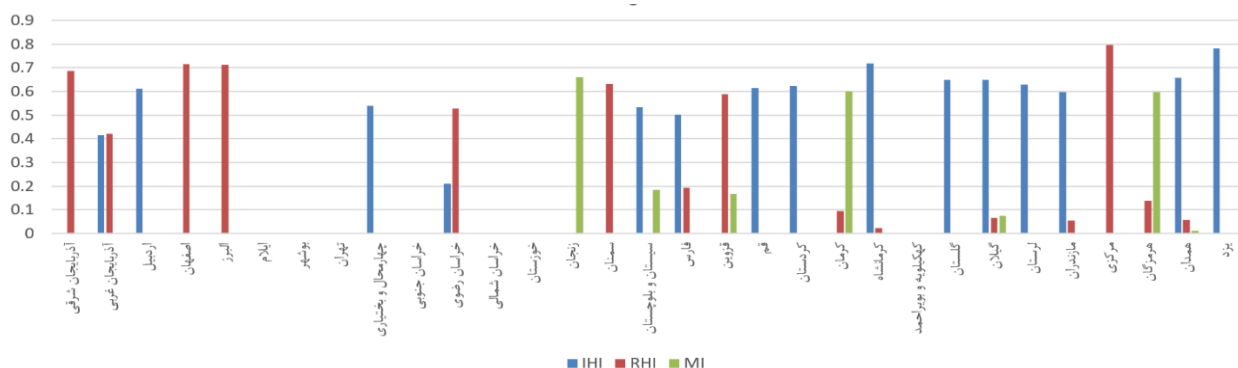


نمودار (۶): نسبت شکاف‌های فناوری اقلیم-بخش اقتصادی (RTGR) و فرامرزی (ITGR) در استان‌های ایران،

۱۴۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق نمودار (۷)، منشأ اصلی ناکارایی در استان‌ها متفاوت است؛ به‌طوری‌که از میان ۲۴ استان ناکارا، IHI در ۱۳ استان، RHI در ۸ استان و MI در ۳ استان مؤلفه غالب است. در هفت استان کارا نیز هر سه مؤلفه تقریباً صفر است. با توجه به تفاوت مصرف انرژی استان‌ها، پس از وزن‌دهی با مصرف واقعی، سهم RHI، IHI و MI از ظرفیت کل صرفه‌جویی کشور به ترتیب ۴۶.۳، ۴۰.۷ و ۱۳ درصد است.



نمودار (۷): سهم نسبی مؤلفه‌های مدیریتی (MI)، ناهمگنی اقلیمی (RHI) و شکاف فناوریانه-ساختاری (IHI) در ناکارایی انرژی

استان‌های ایران، سال ۱۴۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-۴- اعتبارسنجی و سازگاری مدل

کنترل‌های عددی نشان داد برای همه استان‌ها رابطه $TFEE_m \leq TFEE_i \leq TFEE_r$ ، قرارگرفتن RTGR و ITGR در بازه صفر تا یک و رابطه $TFEE_m = TFEE_r \times RTGR \times ITGR$ برقرار است. اگرچه تعداد استان‌ها در برخی گروه‌ها کمتر از قاعده پیشنهادی DEA است (دایسون و همکاران^۱، ۲۰۰۱)، این معیار یک قاعده عملی و نه آزمونی قطعی است (کوک و همکاران^۲، ۲۰۱۴). بنابراین، نتایج با توجه به محدودیت تعداد استان‌ها و در کنار آزمون ناهمگنی و تحلیل استحکام تفسیر می‌شوند.

۴-۵- بررسی استحکام نتایج

برای بررسی حساسیت نتایج، مدل با طبقه‌بندی جایگزین دوگانه اقلیمی نیز برآورد شد.^۳ طبق جدول (۳)، در هر دو طبقه‌بندی میانگین $TFEE_m$ ، تعداد استان‌های کارا و ظرفیت کل صرفه‌جویی تقریباً یکسان است و همبستگی رتبه‌ای امتیازها به ۰.۹۹۶ می‌رسد. بنابراین، نتایج نهایی پایدار است؛ اما سهم مؤلفه‌های مدیریتی و اقلیمی-منطقه‌ای به نحوه گروه‌بندی استان‌ها حساس است.

جدول (۳): مقایسه نتایج در طبقه‌بندی‌های اقلیمی سه‌گانه و دوگانه

شاخص	سه گروه اقلیمی	دو گروه اقلیمی	تفسیر
میانگین $TFEE_m$	۰/۴۶	۰/۴۶	ثابت
استان‌های کارای ملی	۷	۷	ثابت
پتانسیل کل، میلیون بشکه	۸۵۵/۵	۸۵۵/۵	ثابت
سهم مدیریتی وزنی	۱۳٪	۳۸/۹٪	حساس
سهم اقلیمی وزنی	۴۶/۳٪	۲۰/۷٪	حساس
سهم فناوریانه-ساختاری	۴۰/۷٪	۴۰/۵٪	تقریباً ثابت

منبع: یافته‌های تحقیق (محاسبات نویسندگان براساس خروجی مشخصات سه اقلیمی و دو اقلیمی مدل فرامرزی سه‌سطحی)

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج نشان داد میانگین کارایی انرژی استان‌ها در مرز اقلیم-بخش اقتصادی برابر با ۰.۹۲۶، در مرز بخش اقتصادی برابر با ۰.۷۴۲ و در فرامرزی ملی برابر با ۰.۴۶۰ است. کاهش کارایی با گسترده‌ترشدن مجموعه مرجع نشان می‌دهد بخش مهمی از فاصله استان‌ها تا مرز ملی، صرفاً ناشی از عملکرد مدیریتی درون‌استانی نیست و به تفاوت میان مرزهای منطقه‌ای و ساختارهای فناوریانه و اقتصادی نیز مربوط می‌شود. تنها هفت استان تهران، خوزستان، بوشهر، ایلام، کهگیلویه و بویراحمد، خراسان شمالی و خراسان جنوبی در هر سه سطح روی مرز کارایی قرار گرفتند. قرارگرفتن این استان‌ها روی مرز به معنای پایین‌بودن مطلق مصرف انرژی یا انتشار نیست، بلکه نشان‌دهنده عملکرد نسبی بهتر آن‌ها در تبدیل نهاده‌ها به ارزش افزوده، با لحاظ ستاده نامطلوب، است. نتایج Super-SBM نیز امکان تمایز میان استان‌های کارا را فراهم کرد و خوزستان، بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد را در رتبه‌های بالاتر فوق کارایی قرار داد.

^۱ Dyson et al.

^۲ Cook et al.

^۳ برای مشاهده دسته‌بندی استان‌ها به تفکیک دو اقلیمی به جدول ۶ ضمیمه مراجعه شود.

برآوردهای وزن‌دهی شده براساس مصرف واقعی انرژی نشان می‌دهد ظرفیت فنی صرفه‌جویی کشور حدود ۸۸۵.۵ میلیون بشکه معادل نفت خام است. از این مقدار، ۱۱۵.۱ میلیون بشکه (۱۳ درصد) به ناکارایی مدیریتی، ۴۱۰.۱ میلیون بشکه (۴۶.۳ درصد) به شکاف اقلیمی-منطقه‌ای و ۳۶۰.۳ میلیون بشکه (۴۰.۷ درصد) به شکاف فناورانه-ساختاری مربوط می‌شود. بنابراین، حدود ۸۷ درصد ظرفیت صرفه‌جویی با تفاوت میان مرزهای گروهی و ملی ارتباط دارد و صرفاً ناشی از مدیریت درون‌استانی نیست. البته سهم ۴۶.۳ درصدی مؤلفه اقلیمی-منطقه‌ای، فاصله استان‌ها از مرزهای مقایسه‌ای را نشان می‌دهد و نباید به معنای اثر علی مستقیم شرایط آب‌وهوایی بر ناکارایی انرژی تفسیر شود. آزمون کروسکال-والیس نیز نشان داد تفاوت میان گروه‌های شش‌گانه اقلیمی-اقتصادی برای شاخص‌های RTGR، ITGR، TFEEm، TFEER و RHI در سطح پنج درصد معنادار است؛ درحالی‌که تفاوت TFEEm و MI معنادار نبود. این یافته نشان می‌دهد ناهمگنی گروه‌ها بیشتر در شکاف‌های فناوری، کارایی بخش اقتصادی و مؤلفه‌های اقلیمی-منطقه‌ای و فناورانه-ساختاری مشاهده می‌شود، اما شواهد آماری کافی برای تفاوت کارایی مدیریتی و کارایی نهایی فرامرزی میان گروه‌ها وجود ندارد. به دلیل کوچک و نامتوازن بودن تعداد استان‌های بعضی گروه‌ها، این نتایج استنباطی باید با احتیاط تفسیر شوند.

همچنین نتایج بررسی استحکام نیز نشان داد با جایگزینی طبقه‌بندی اقلیمی دوگانه، میانگین کارایی فرامرزی همچنان ۰.۴۶۰ باقی می‌ماند، همان هفت استان روی مرز ملی قرار می‌گیرند و ضریب همبستگی رتبه‌ای امتیازهای دو مشخصات به ۰.۹۹۶ می‌رسد. همچنین، تفاوت ظرفیت کل صرفه‌جویی انرژی در دو طبقه‌بندی کمتر از یک درصد است. بنابراین، نتایج مربوط به کارایی نهایی استان‌ها، رتبه‌بندی آن‌ها و ظرفیت کل صرفه‌جویی پایدار است؛ اما سهم دقیق مؤلفه‌های ناکارایی به نحوه طبقه‌بندی اقلیمی حساس است و باید مشروط به تعریف گروه‌ها گزارش شود.

از نظر سیاستی، نوع مداخله باید متناسب با مؤلفه غالب ناکارایی هر استان تعیین شود. در زنجان، کرمان و هرمزگان، غلبه مؤلفه مدیریتی ضرورت بررسی فرایندهای بهره‌برداری و مدیریت مصرف را نشان می‌دهد. در اصفهان، خراسان رضوی، آذربایجان شرقی، مرکزی و البرز، غلبه مؤلفه اقلیمی-منطقه‌ای بیانگر لزوم بررسی محدودیت‌های منطقه‌ای و زیرساختی است. در یزد، فارس، مازندران، گلستان و لرستان نیز بزرگ‌تر بودن مؤلفه فناورانه-ساختاری، ضرورت توجه به نوسازی فناوری و ساختار فعالیت‌های اقتصادی را برجسته می‌کند. این پیشنهادها تفسیر سیاستی مؤلفه‌های مدل‌اند و برای تعیین مداخله مشخص به بررسی‌های تکمیلی استانی نیاز دارند. از نظر حجم صرفه‌جویی بالقوه نیز اصفهان، خراسان رضوی، فارس، یزد و کرمان در اولویت بررسی قرار می‌گیرند.

در مجموع، بهبود مدیریت مصرف انرژی شرط لازم برای ارتقای کارایی است، اما به‌تنهایی کافی نیست. سیاست‌گذاری مؤثر باید از تعیین هدف یکسان برای همه استان‌ها پرهیز کند و ترکیبی از اصلاحات مدیریتی، نوسازی فناوری، اصلاح ساختار فعالیت‌ها و توسعه زیرساخت‌های متناسب با ویژگی‌های هر استان را در بر گیرد. با توجه به مقطعی و نسبی بودن نتایج DEA، مقادیر صرفه‌جویی برآوردشده بیانگر ظرفیت فنی‌اند و نباید به‌عنوان پیش‌بینی قطعی کاهش مصرف تلقی شوند. استفاده از داده‌های تابلویی، روش‌های بوت‌استرپ و طبقه‌بندی‌های جایگزین می‌تواند در مطالعات آینده پایداری و قابلیت تعمیم نتایج را دقیق‌تر ارزیابی کند.

تضاد منافع

نویسندگان نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

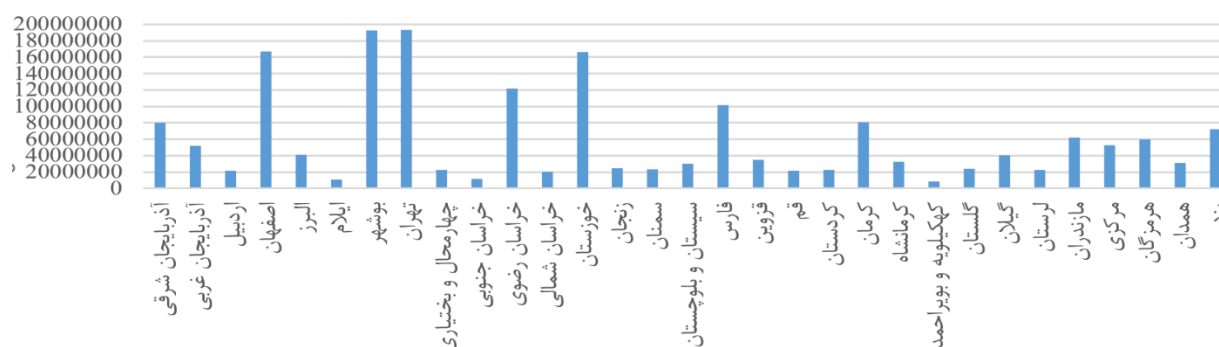
فهرست منابع

1. Andersen, P., & Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management science*, 39(10), 1261-1264.
2. Aydin, S., & Şenel, T. (2025). Evaluating energy efficiency in Turkish electric distribution using network DEA and GA models. *Scientific Reports*, 15(1), 21790.
3. Azami, S., & Azhand, H. (2025). Total factor ecological energy efficiency and total factor carbon efficiency of Iranian provinces: An application of data envelopment analysis and Tobit model. *Applied Theories of Economics*, 12(3), 49–80 (In Persian).
4. Azami, S., Pour-Karimi, L., & Sadri, S. (2018). Total factor CO₂ emission performance in Iranian manufacturing industries: Meta-frontier non-radial Malmquist index approach. *Journal of Research in Economic Modeling*, 8(31), 131–163 (In Persian).
5. Balali, H., Farzanegan, M. R., Zamani, O., & Baniasadi, M. (2023). *Air pollution and economic sanctions in Iran* (No. 03-2023). MAGKS Joint Discussion Paper Series in Economics.
6. Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management science*, 30(9), 1078-1092.
7. Battese, G. E., Rao, D. S. P., & O'Donnell, C. J. (2004). A metafrontier production function for estimation of technical efficiencies and technology gaps for firms operating under different technologies. *Journal of productivity analysis*, 21(1), 91-103.
8. bp. (2022). BP statistical review of world energy 2022 (71st ed.). bp p.l.c.
9. Central Bank of the Islamic Republic of Iran. (n.d.). Net capital stock by type of asset at constant 1395 prices [Data set]. Tehran, Iran (In Persian).
10. Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
11. Chen, Y., Wang, M., Feng, C., Zhou, H., & Wang, K. (2021). Total factor energy efficiency in Chinese manufacturing industry under industry and regional heterogeneities. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105255.
12. Cook, W. D., Tone, K., & Zhu, J. (2014). Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. *Omega*, 44, 1-4.
13. Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., ... & Pekar, F. (2025). GHG emissions of all world countries—2025 report. Publications Office of the European Union.
14. Dyson, R. G., Allen, R., Camanho, A. S., Podinovski, V. V., Sarrico, C. S., & Shale, E. A. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. *European Journal of operational research*, 132(2), 245-259.
15. Eftekhary, M., Gholami, P., Safari, S., & Shojaei, M. (2012). Ranking normalization methods for improving the accuracy of SVM algorithm by DEA method. *Modern applied science*, 6(10), 26–36.
16. Ervural, B. C., Ervural, B., & Zaim, S. (2016). Energy efficiency evaluation of provinces in Turkey using data envelopment analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 235, 139-148.
17. Feng, C., Wang, M., Zhang, Y., & Liu, G. C. (2018). Decomposition of energy efficiency and energy-saving potential in China: A three-hierarchy meta-frontier approach. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1054-1064.
18. 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.
19. Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Safarzadeh, D., Ahmadi, E., & Nabavi-Pelesaee, A. (2018). Optimization of energy consumption of dairy farms using data envelopment analysis—A case study: Qazvin city of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), 217-228.
20. Huang, X., & Zhao, R. (2024). Regional differences and improvement potential of carbon emission efficiency in China's power industry: insights from meta-frontier DEA model considering integer constraints. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1339553.
21. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 2: Energy; Vol. 3: Industrial Processes and Product Use). Institute for Global Environmental Strategies.
22. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici, Eds.). Geneva, Switzerland: Author.

23. Iqbal, M., Ma, J., Mushtaq, Z., Ahmad, N., Yousaf, M. Z., Tarawneh, B., ... & Zaitsev, I. (2025). Energy efficiency evaluation of construction projects using data envelopment analysis and Tobit regression. *Scientific Reports*, 15(1), 11444.
24. Ministry of Energy of the Islamic Republic of Iran. (2022). Energy balance sheet of Iran, 1400 [2021/22]. Tehran, Iran (In Persian).
25. Mirzaei, M., & Bekri, M. (2017). Energy consumption and CO2 emissions in Iran, 2025. *Environmental research*, 154, 345-351.
26. Mohammadi, M., Fattahi, S., & Sohaili, K. (2021). Examination of relationship between energy consumption and Iran's provinces gross product using wavelet analysis with panel data. *Iranian Energy Economics*, 10(40), 125-159 (In Persian).
27. Mozayani, A. H. (2019). Estimating provincial capital stock in Iran economy. *Quarterly Journal of Fiscal and Economic Policies*, 7(26), 7-29.
28. Nazemi, A., Karimi, F., Mamipoor, S., & Feshari, M. (2019). Energy efficiency in Iran provinces: DEA approach. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 5(1), 103-142. (In Persian).
29. O'Donnell, C. J., Rao, D. S. P., & Battese, G. E. (2008). Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios. *Empirical economics*, 34(2), 231-255.
30. Pakkar, M. S. (2015). Using DEA and AHP for Multiplicative Aggregation of Hierarchical Indicators. *American Journal of Operations Research*, 5(05), 327-336.
31. Seiford, L. M., & Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European journal of operational research*, 142(1), 16-20.
32. Seyef, A. M., & Hamidi Razi, D. (2017). Identification of factors that influence Iran's provincial energy intensity index: A spatial dynamic panel data approach. *Quarterly Energy Economics Review*, 13(53), 61-103 (In Persian).
33. Shafie-Pour, M., & Ardestani, M. (2007). Environmental damage costs in Iran by the energy sector. *Energy Policy*, 35(9), 4413-4423.
34. Shahraki, A. S., Caloiero, T., & Bazrafshan, O. (2023). Influence of climatic factors on yields of pistachio, mango, and bananas in Iran. *Sustainability*, 15(11), 8962.
35. Statistical Center of Iran. (2022a). Results of the labour force survey, 1400 [2021/22]. Tehran, Iran (In Persian).
36. Statistical Center of Iran. (2022b). Statistical yearbook of Iran, 1400 [2021/22]. Tehran, Iran (In Persian).
37. Statistical Center of Iran. (2023). Provincial accounts: Gross value added of economic activities by province at constant 1400 prices [Data set]. Tehran, Iran (In Persian).
38. Tian, Z., Hu, G., & Mu, X. (2024). Urban green total factor energy efficiency and its decomposition under a multidimensional heterogeneity framework: a case study of the Yellow River Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(36), 48999-49025.
39. Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European journal of operational research*, 130(3), 498-509.
40. Tone, K. (2002). A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 32-41.
41. Tone, K. (2004). Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure (SBM) approach. Paper presented at the North American Productivity Workshop III, Toronto, Canada.
42. U.S. Environmental Protection Agency. (2023). Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances. Washington, DC: National Center for Environmental Economics.
43. Valadkhani, A., & Moradi-Motlagh, A. (2025). Examining inefficiency in countries with high energy consumption: A benchmarking approach. *Energy Economics*, 145, 108487.
44. Wang, J., Xu, R., & Ye, S. (2025). Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of China's interprovincial industrial green efficiency based on the super-efficiency SBM model. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1625233.
45. Wang, K., Wang, Y., & Zhang, J. (2025). Regional differences and convergence of land use efficiency towards carbon neutrality in China's Yangtze river economic belt. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1577863.
46. Wang, X., Lu, Y., Chen, C., Yi, X., & Cui, H. (2024). Total-factor energy efficiency of ten major global energy-consuming countries. *Journal of Environmental Sciences*, 137, 41-52.
47. Ye, Y., Xu, Z., & Chen, W. (2023). The heterogeneous effect of financial technology on green total factor productivity in China. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(3), 100390.

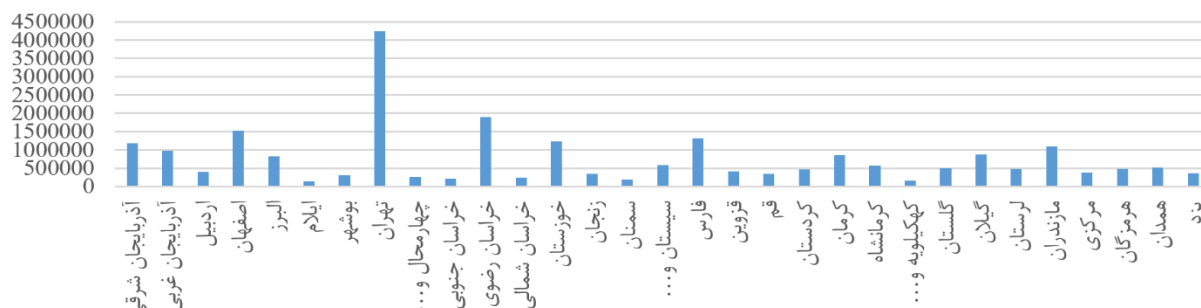
48. Yu, J., Zhou, K., & Yang, S. (2019). Regional heterogeneity of China's energy efficiency in "new normal": A meta-frontier Super-SBM analysis. *Energy Policy*, 134, 110941.
49. Zhang, N., & Choi, Y. (2013). Environmental energy efficiency of China's regional economies: A non-oriented slacks-based measure analysis. *The social science journal*, 50(2), 225-234.
50. Zhao, P. J., Zeng, L. E., Lu, H. Y., Zhou, Y., Hu, H. Y., & Wei, X. Y. (2020). Green economic efficiency and its influencing factors in China from 2008 to 2017: Based on the super-SBM model with undesirable outputs and spatial Dubin model. *Science of the Total Environment*, 741, 140026.

پیوست:



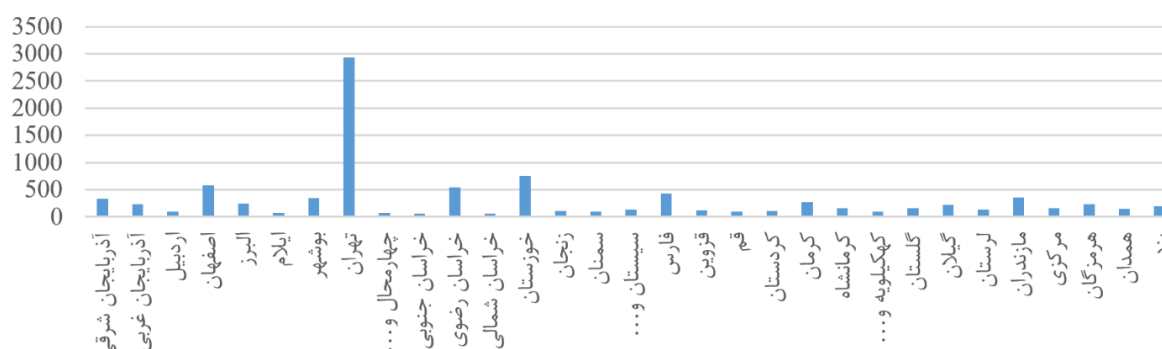
نمودار (۱): مجموع بشکه معادل نفت خام مصرف انرژی به تفکیک استان در سال ۱۴۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق



نمودار (۲): جمعیت شاغل ۱۵ ساله و بیش تر بر حسب اشتغال (رسمی یا غیررسمی) به تفکیک استان در سال ۱۴۰۰

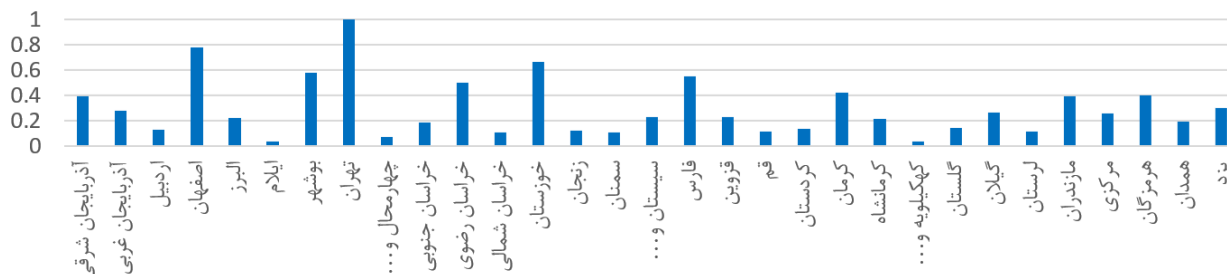
منبع: مرکز آمار ایران



نمودار (۳): سرمایه خالص کل به تفکیک انواع دارایی‌ها به قیمت‌های ثابت سال ۱۳۹۵ (بانک مرکزی) - هزار

میلیارد تومان

منبع: یافته‌های تحقیق



نمودار (۴): هزینه اجتماعی انتشار ۳ گاز اصلی گلخانه‌ای به تفکیک استان در سال ۱۴۰۰ (نرمال شده)

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۱): تفکیک استان‌ها از نظر اقلیمی

استان‌ها	اقلیم
آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، کردستان، کرمانشاه، همدان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، خراسان شمالی	سرد
گیلان، مازندران، گلستان، قزوین، البرز، تهران، سمنان، اصفهان، مرکزی، فارس	معتدل
قم، یزد، کرمان، خراسان رضوی، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، خوزستان، بوشهر، هرمزگان، ایلام	گرم و خشک

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۲): نتایج آزمون کروسکال-والیس برای بررسی تفاوت میان گروه‌های اقلیمی-اقتصادی (۶ گروه)

شاخص	آماره χ^2	سطح معنی‌داری (P-value)	نتیجه
RTGR	۱۴.۲۳	۰.۰۱	معنادار
ITGR	۱۶.۵۱	۰.۰۰	معنادار
IHI	۱۵.۵۱	۰.۰۰	معنادار
RHI	۱۳.۹۲	۰.۰۱	معنادار
TFEEr	۱.۶۷	۰.۸۹	غیرمعنادار
TFEEi	۱۲.۷۴	۰.۰۲	معنادار
TFEEem	۴.۵۶	۰.۴۷	غیرمعنادار
MI	۲.۲۱	۰.۸۱	غیرمعنادار

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۳): ضرایب تبدیل سایر سوخت‌ها به معادل بشکه نفت خام

حامل انرژی	واحد اولیه داده‌های استانی	تبدیل‌های میانی (طبق BP)	ضریب نهایی تبدیل به BOE	فرمول کلی مورد استفاده در مقاله
گاز طبیعی	million m ³	1 billion m ³ = 5.883 million BOE	1 million m ³ = 5,883 BOE	BOE = NG (million m ³) × 5,883
برق	GWh	1 kWh = 3.6 MJ = 0.0036 GJ; 1 GWh = 3,600 GJ; 1 BOE = 6.119 GJ	1 GWh ≈ 588.44 BOE	BOE = Electricity (GWh) × 588.44
بنزین	million L	1 kL = 0.753 tonne; 1 tonne = 7.313 BOE	1 million L ≈ 5,503 BOE	BOE = Gasoline (million L) × 1000 × 0.753 × 7.313
نفت سفید	million L	1 kL = 0.798 tonne; 1 tonne = 7.177 BOE	1 million L ≈ 5,728 BOE	BOE = Kerosene (million L) × 1000 × 0.798 × 7.177
گازوئیل	million L	1 kL = 0.843 tonne; 1 tonne = 7.089 BOE	1 million L ≈ 5,977 BOE	BOE = Diesel (million L) × 1000 × 0.843 × 7.089

BOE = Fuel oil (million L) × 1000 × 0.991 × 6.793	1 million L ≈ 6,728 BOE	1 kL = 0.991 tonne; 1 tonne = 6.793 BOE	million L	نفت کوره
BOE = LPG (million L) × 1000 × 0.541 × 7.542	1 million L ≈ 4,077 BOE	1 kL = 0.541 tonne; 1 tonne = 7.542 BOE	million L	گاز مایع

منبع: محاسبات نویسندگان بر اساس گزارش BP (2022), Statistical Review of World Energy 2022

جدول (۴): خلاصه آمار توصیفی متغیرهای ورودی و خروجی مدل DEA

متغیر	نقش	واحد	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	ضریب تغییرات	تعداد مشاهدات
مصرف انرژی (نهایی)	ورودی	میلیون بشکه معادل نفت خام	۵۹.۴۹	۵۳.۴۷	۸.۴۴	۱۹۳.۱۳	۰.۹	۳۱
موجودی سرمایه	ورودی	هزار میلیارد تومان	۳۰۷.۹	۵۰۷.۶	۵۷.۹	۲۹۳۸.۵	۱.۶۵	۳۱
نیروی کار	ورودی	نفر	۷۵۶۳۶۹	۷۶۸۸۰۲	۱۴۱۸۱۴	۴۲۴۸۹۱۹	۱.۰۲	۳۱
تولید ناخالص استانی	خروجی	میلیون ریال	۲۸۴۵۱۰۴	۳۸۲۸۲۷۴	۴۴۵۵۸۰	۱۷۹۱۲۷۷۶	۱.۴	۳۱
هزینه اجتماعی انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO ₂ ، N ₂ O، CH ₄)	خروجی نامطلوب	میلیون دلار	۴۴۷۴.۵۵	۳۳۹۱.۳۹	۵۱۷.۴۱	۱۵۰۸۹.۷۹	۰.۷۶	۳۱

منبع: یافته‌های تحقیق^۱

جدول (۵): امتیاز کارایی انرژی استان‌ها و تجزیه ناکارایی به مؤلفه‌های مدیریتی، اقلیمی و فناورانه-ساختاری

ردیف	استان	TFEE _m	TFEE _r	TFEE _i	RTGR	ITGR	MI	RHI	IHI	کل مصرف انرژی معادل نفت خام
۱	تهران	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱۹۳,۱۳۳,۶۷۶.۳۰
۲	خوزستان	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱۶۵,۸۷۸,۸۷۸.۸۰
۳	ایلام	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱۱,۰۶۵,۸۰۲.۲۹
۴	خراسان جنوبی	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱۱,۱۷۳,۷۶۹.۳۰
۵	کهگیلویه و بویراحمد	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۸,۴۴۳,۰۱۷.۹۰
۶	خراسان شمالی	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱۹,۷۸۹,۴۹۱.۵۲
۷	بوشهر	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۱۹۲,۷۷۴,۵۶۴.۴۰
۸	چهارمحال و بختیاری	۰.۴۶	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۴۶	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۵۴	۲۲,۷۱۴,۶۹۲.۵۰
۹	اردبیل	۰.۳۹	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۹	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۱	۲۱,۷۳۹,۴۲۳.۲۱
۱۰	قم	۰.۳۹	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۹	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۱	۲۱,۸۶۸,۲۲۴.۹۰
۱۱	کردستان	۰.۳۸	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۲	۲۲,۳۳۵,۳۰۰.۲۵
۱۲	لرستان	۰.۳۷	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۷	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۳	۲۲,۷۸۲,۸۹۶.۸۲
۱۳	گلستان	۰.۳۵	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۵	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۵	۲۳,۹۹۲,۹۴۲.۹۵

^۱ نتایج جدول (۴) ضمیمه نشان می‌دهد که ضرایب تغییرات محاسبه شده برای تمامی متغیرهای مدل در دامنه ۰.۷۶ تا ۱.۶۵ قرار دارد که بیانگر ناهمگنی قابل توجه استان‌های ایران از نظر اندازه اقتصاد، مصرف انرژی، موجودی سرمایه، تولید و پیامدهای زیست‌محیطی است. بیشترین پراکندگی مربوط به موجودی سرمایه (۱.۶۵) و تولید ناخالص استانی (۱.۴) بوده که نشان‌دهنده تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و ظرفیت تولید در تعداد محدودی از استان‌هاست. این ناهمگنی، فرض مشابه بودن شرایط و الگوی تولید در همه استان‌ها را تضعیف کرده و ضرورت به کارگیری چارچوب فرامرزی سه‌سطحی را به جای یک مرز فناوری مشترک توجیه می‌کند.

۲۹,۸۲۰,۴۸۲.۴۵	۰.۵۳	۰.۰۰	۰.۱۸	۰.۳۵	۱.۰۰	۰.۸۲	۰.۸۲	۰.۲۸	سیستان و بلوچستان	۱۴
۳۱,۰۲۱,۶۷۷.۰۰	۰.۶۶	۰.۰۶	۰.۰۱	۰.۲۹	۰.۹۴	۰.۹۳	۰.۹۹	۰.۲۷	همدان	۱۵
۳۲,۵۵۰,۶۸۹.۲۳	۰.۷۲	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۲۷	۰.۹۸	۰.۹۸	۱.۰۰	۰.۲۶	کرمانشاه	۱۶
۶۱,۶۹۱,۴۹۲.۰۰	۰.۶۰	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۳۷	۰.۹۵	۰.۹۵	۱.۰۰	۰.۳۵	مازندران	۱۷
۷۲,۴۶۱,۰۸۹.۸۹	۰.۷۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۲۲	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۲۲	یزد	۱۸
۱۰۱,۷۱۲,۱۸۰.۴۰	۰.۵۰	۰.۱۹	۰.۰۰	۰.۳۸	۰.۸۱	۰.۸۱	۱.۰۰	۰.۳۱	فارس	۱۹
۲۲,۸۴۷,۰۹۷.۸۷	۰.۰۰	۰.۶۳	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۷	۰.۳۷	۱.۰۰	۰.۳۷	سمنان	۲۰
۴۰,۲۷۷,۷۵۹.۵۸	۰.۶۵	۰.۰۷	۰.۰۷	۰.۲۴	۰.۹۳	۰.۸۶	۰.۹۳	۰.۲۱	گیلان	۲۱
۸۰,۱۸۵,۲۹۳.۲۴	۰.۰۰	۰.۶۹	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۱	۰.۳۱	۱.۰۰	۰.۳۱	آذربایجان شرقی	۲۲
۲۴,۹۸۶,۱۴۹.۷۷	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۶۶	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۳۴	زنجان	۲۳
۱۲۲,۲۵۴,۱۶۵.۳۰	۰.۲۱	۰.۵۳	۰.۰۰	۰.۵۶	۰.۴۷	۰.۴۷	۱.۰۰	۰.۲۶	خراسان رضوی	۲۴
۴۱,۰۲۹,۸۴۴.۶۶	۰.۰۰	۰.۷۱	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۲۹	۰.۲۹	۱.۰۰	۰.۲۹	البرز	۲۵
۱۶۶,۷۰۲,۷۸۱.۷۰	۰.۰۰	۰.۷۱	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۲۹	۰.۲۹	۱.۰۰	۰.۲۹	اصفهان	۲۶
۵۱,۶۶۸,۰۲۶.۳۰	۰.۴۲	۰.۴۲	۰.۰۰	۰.۲۸	۰.۵۸	۰.۵۸	۱.۰۰	۰.۱۶	آذربایجان غربی	۲۷
۸۰,۶۵۸,۴۱۹.۰۲	۰.۰۰	۰.۱۰	۰.۶۰	۱.۰۰	۰.۷۶	۰.۳۰	۰.۴۰	۰.۳۰	کرمان	۲۸
۳۴,۵۵۷,۱۶۲.۹۸	۰.۰۰	۰.۵۹	۰.۱۷	۱.۰۰	۰.۲۹	۰.۲۴	۰.۸۳	۰.۲۴	قزوین	۲۹
۵۹,۴۸۵,۸۴۸.۵۳	۰.۰۰	۰.۱۴	۰.۶۰	۱.۰۰	۰.۶۶	۰.۲۷	۰.۴۰	۰.۲۷	هرمزگان	۳۰
۵۲,۴۸۲,۶۷۵.۰۴	۰.۰۰	۰.۸۰	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۱.۰۰	۰.۲۰	مرکزی	۳۱
۱,۸۴۴,۰۸۵,۵۱۶									جمع	
	۰.۲۸	۰.۱۸	۰.۰۷	۰.۶۹	۰.۸۰	۰.۷۴	۰.۹۳	۰.۴۶	میانگین	

منبع: یافته‌های تحقیق

برای برآورد معادل صرفه‌جویی انرژی، مجموع مؤلفه‌های ناکارایی هر استان در میزان مصرف واقعی انرژی آن ضرب شد. برای نمونه، در استان سیستان و بلوچستان، ناکارایی کل برابر با ۰.۷۱۷ است که از ۰.۱۸۳ ناکارایی مدیریتی، صفر ناکارایی اقلیمی-منطقه‌ای و ۰.۵۳۴ ناکارایی فناوری-ساختاری تشکیل می‌شود. با توجه به مصرف انرژی ۲۹۸۲۰۴۸۲ بشکه معادل نفت خام، پتانسیل صرفه‌جویی این استان حدود ۲۱۳۷۷۴۶۴ بشکه برآورد می‌شود. در سطح کشور، ظرفیت کل صرفه‌جویی برابر با ۸۸۵.۴۶ میلیون بشکه معادل نفت خام است. از این مقدار، مؤلفه مدیریتی معادل ۱۱۵.۰۵ میلیون بشکه (۱۳ درصد)، مؤلفه اقلیمی-منطقه‌ای معادل ۴۱۰.۱۲ میلیون بشکه (۴۶.۳ درصد) و مؤلفه فناوری-ساختاری معادل ۳۶۰.۲۸ میلیون بشکه (۴۰.۷ درصد) است.

جدول (۶): تفکیک استان‌ها از نظر اقلیمی

اقلیم	استان‌ها
سردتر	آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، البرز، ایلام، تهران، چهارمحال و بختیاری، خراسان رضوی، خراسان شمالی، زنجان، قزوین، کردستان، کرمانشاه، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، همدان، گلستان، گیلان و مازندران
گرم‌تر	اصفهان، بوشهر، خراسان جنوبی، خوزستان، سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، قم، کرمان، مرکزی، هرمزگان و یزد

منبع: یافته‌های تحقیق

برای تعیین گروه‌های اقلیمی استان‌ها، طبقه‌بندی استانی ارائه‌شده توسط شهرکی و همکاران^۱ (۲۰۲۳) مبنا قرار گرفت. در مطالعه مذکور، استان‌های ایران در چهار گروه سرد، معتدل و مرطوب، گرم و خشک و گرم و مرطوب طبقه‌بندی شده‌اند. با توجه به محدودیت تعداد واحدهای تصمیم‌گیرنده و ضرورت جلوگیری از تشکیل زیرگروه‌های کوچک در مدل فرامرزی، چهار طبقه مذکور در دو گروه عملیاتی تجمیع شدند. به این منظور، استان‌های واقع در طبقات سرد و معتدل و مرطوب در گروه اقلیمی سردتر و استان‌های واقع در طبقات گرم و خشک و گرم و مرطوب در گروه اقلیمی گرم‌تر قرار گرفتند. بر این اساس، ۱۹ استان در گروه سرد و معتدل و ۱۲ استان در گروه گرم طبقه‌بندی شدند.

*نحوه محاسبه هزینه اجتماعی گازهای گلخانه‌ای

ابتدا اطلاعات مصرف سوخت هر استان در سال ۱۴۰۰ از ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰، صفحه ۱۶۱، جدول (۷۵-۱) با عنوان مصارف استانی پنج فرآورده اصلی در سال ۱۴۰۰ استخراج شد. سپس از همان ترازنامه، صفحه ۲۵۷، جدول (۲۱۹-۱) با عنوان میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی کشور در سال ۱۴۰۰ به تفکیک سوخت، مقدار کل انتشار سه گاز گلخانه‌ای اصلی (CH_4 ، CO_2 و N_2O) برای هر نوع سوخت در سطح کشور به‌دست آمد.

بر اساس این اطلاعات، برای هر سوخت، ضریب انتشار تعریف شد که برابر است با نسبت انتشار کل گاز به مصرف کل آن سوخت در کشور. با ضرب مصرف استانی هر سوخت در ضریب انتشار متناظر، مقدار انتشار CH_4 ، CO_2 و N_2O برای هر استان در سال ۱۴۰۰ محاسبه گردید و با جمع کردن انتشار ناشی از همه انواع سوخت در هر استان، مقدار انتشار سالانه هر یک از سه گاز CH_4 ، CO_2 و N_2O برای آن استان به‌دست آمد.

برای تبدیل این مقادیر انتشار به هزینه اجتماعی، از گزارش آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۲، جدول صفحه ۱۵۴۳ استفاده شد. این ارقام در گزارش EPA به دلار ثابت سال ۲۰۲۰، براساس خسارت‌های جهانی و با نرخ تنزیل ۲ درصد گزارش شده‌اند و برآورد اختصاصی هزینه اجتماعی انتشار در ایران محسوب نمی‌شوند. به دلیل نبود ضرایب رسمی متناظر برای ایران، این مقادیر صرفاً برای تبدیل انتشار سه گاز به یک مقیاس پولی مشترک به کار رفتند. استفاده از این ضرایب به معنای یکسان‌بودن شرایط مدیریتی، اقتصادی یا فناورانه ایران و ایالات متحده نیست؛ زیرا تفاوت عملکرد استان‌ها مستقل از این ضرایب و براساس داده‌های استانی سنجیده شده است. در این مطالعه، انتشار هر یک از سه گاز در هر استان در مقدار هزینه اجتماعی متناظر ضرب و مجموع آن‌ها محاسبه شد تا یک شاخص واحد از هزینه اجتماعی انتشار گازهای گلخانه‌ای برای هر استان به‌عنوان خروجی نامطلوب در مدل DEA استفاده شود.

به‌عنوان نمونه، برای استان آذربایجان شرقی، بر اساس ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰ مصرف بنزین این استان برابر ۱۱۶۶.۵ میلیون لیتر، مصرف کل بنزین کشور ۳۱۸۵۱.۴ میلیون لیتر و کل انتشار CO_2 ناشی از مصرف بنزین در کشور ۷۵۷۷۹۰۲۷ تن گزارش شده است. بنابراین انتشار CO_2 ناشی از مصرف بنزین استان آذربایجان شرقی در سال ۱۴۰۰ به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$E_{\text{CO}_2}^{\text{EA, gasoline}} = 75,779,027 \times \frac{1,166.5}{31,851.4} \approx 2,774,700 \text{ tons} \quad (۱)$$

^۱ Shahraki et al. (2023)

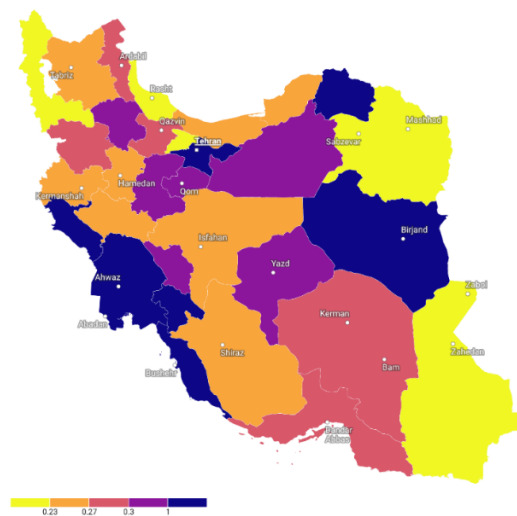
^۲ Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, 2023

^۳ با عنوان Table A.5.1: Unrounded SC-CO₂, SC-CH₄, and SC-N₂O Values, 2020–2080

با در نظر گرفتن هزینه اجتماعی ۱۹۷ دلار برای هر تن CO_2 در سال ۲۰۲۱ (نرخ تنزیل ۲ درصد)، هزینه اجتماعی انتشار CO_2 ناشی از مصرف بنزین این استان برابر است با:

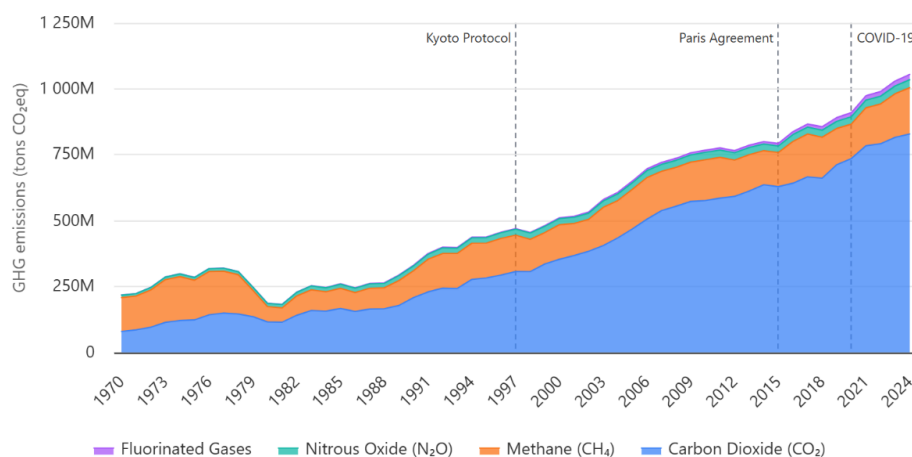
$$SC_{\text{CO}_2}^{\text{EA, gasoline}} = 2,774,700 \times 197 \approx 546,612,900 \text{ USD} \quad (۲)$$

این مثال نحوه تبدیل مصرف سوخت به انتشار CO_2 و سپس تبدیل انتشار به هزینه اجتماعی را در سطح استانی نشان می‌دهد.



شکل (۱): توزیع فضایی امتیاز Super-SBM استان‌های ایران در سال ۱۴۰۰

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۲): روند انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران به تفکیک نوع گاز طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۲۴

(میلیون تن معادل دی‌اکسید کربن)

منبع: پایگاه داده انتشار برای پژوهش جهانی جو (EDGAR^۱)

^۱ Emissions Database for Global Atmospheric Research