



Total Factor Ecological Energy Efficiency and Total Factor Carbon Efficiency of Iranian Provinces: An Application of Data Envelopment Analysis and Tobit Model

Somayeh Azami¹, Hawzhin Azhand²

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Economics, Razi University, Kermanshah, Iran. s.azami@razi.ac.ir

2. Master of Energy Economics, Department of Economics, Razi University, Kermanshah, Iran. havzhinazhand@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Improving green efficiency as a pathway to sustainable development provides not only environmental benefits but also energy security. This study aims to examine the total factor ecological energy efficiency (ETFEE) and total factor carbon efficiency (TFCEE) of Iranian provinces over the period 2006–2018. To this end, CO ₂ emissions for Iranian provinces were calculated in accordance with the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines. Subsequently, total factor ecological energy efficiency (ETFEE) and total factor carbon efficiency (TFCEE) were estimated using Data Envelopment Analysis (DEA). The results indicate that the average ETFEE and TFCEE of Iranian provinces are 42.67% and 24.98%, respectively. Production has a positive influence on ETFEE and TFCEE in provinces with high and low GDP shares. However, due to heterogeneous results, it cannot be concluded that production has a positive effect on ETFEE and TFCEE in provinces with medium GDP shares. Tobit model estimates indicate that energy intensity has a significant negative impact on both ETFEE and TFCEE, while innovation has a positive and significant effect on these efficiency indicators. The industrial structure does not have a substantial impact on ETFEE or TFCEE. Policy recommendations include energy policy reforms, replacement of outdated equipment, and adoption of modern production technologies to reduce energy intensity. Additionally, support for research and development can substantially enhance energy and carbon efficiency.
Article history: Received: March 2025 Accepted: August 2025	
JEL: Q50, O30, C61, C24.	
Keywords: Total Factor Ecological Energy Efficiency, Total Factor Environmental Efficiency, SBM, DDF, Tobit Regression.	
Cite this article: 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. <i>Applied Theories of Economic</i> , 12(3), 49-80. https://doi.org/10.22034/ecoj.2025.66157.3409	
	© The Author(s). DOI: 10.22034/ecoj.2025.66157.3409
	Publisher: University of Tabriz

Introduction

Increasing production is achievable through higher input utilization, with energy—particularly fossil fuels—being a significant input. Two critical challenges associated with energy consumption are energy security and emissions of pollutants. One solution to address these issues is improving energy efficiency. Enhanced energy efficiency can prevent wastage (ensuring energy security) and reduce greenhouse gas emissions, a key indicator of environmental quality, thereby improving environmental outcomes.

Given the importance of “sustainable development,” another dimension of efficiency, termed “environmental efficiency,” has emerged. This refers to producing more goods and services with a given set of inputs while emitting less CO₂. Environmental efficiency focuses on the effective use of resources and minimizing pollution. If economic activities lack environmental efficiency, achieving sustainable development becomes challenging. In recent years, research on energy efficiency has increased significantly. Carbon emission efficiency is the most direct approach to reducing carbon, but it is often conflated with energy efficiency and has received limited research attention on its own.

This study has several notable features. First, it analyzes two indicators: total factor ecological energy efficiency (ETFEE) and total factor carbon efficiency (TFCEE) in Iranian provinces. The dual indicators allow examination of efficiency from both energy and carbon perspectives and enable cross-validation of results. Second, the study focuses on Iranian provinces, providing more granular insights despite the challenges in calculating CO₂ emissions at the provincial level. The Tobit model is employed to examine factors affecting energy and carbon efficiency. Since efficiency indices range between 0 and 1, the Tobit model allows for unbiased and consistent coefficient estimation.

Methodology

The study aims to analyze total factor energy and carbon efficiency across Iranian provinces during 2006–2018. Both indicators consider all production inputs and treat CO₂ emissions as undesirable outputs. For total factor ecological energy efficiency, the focus is on the ratio of target energy to actual energy. In contrast, for total factor environmental efficiency, it is the ratio of target to actual CO₂ emissions. Using Data Envelopment Analysis (DEA) and the SBM model, ETFEE is calculated, and using DEA with the directional distance function (DDF), TFCEE is computed. Finally, the Tobit model is applied to examine factors influencing energy and environmental efficiency.

Results and discussion

The average total factor ecological energy efficiency of Iranian provinces is 42.67%, and the average total factor carbon efficiency is 24.98%. Based on both indicators, Tehran province exhibits the highest efficiency, while North Khorasan has the lowest. Khuzestan, despite its high GDP share, has low efficiency in both measures. Conversely, Semnan province, with a low GDP share, demonstrates high efficiency. Ilam, with a medium GDP share, has medium to low efficiency. Provinces such as East Azerbaijan, Ardabil, Kerman, Golestan, Gilan, Mazandaran, and Hormozgan, which have medium GDP shares, show above-average efficiency. This suggests that production may be a key determinant of energy and carbon efficiency in high (group 1) and low (group 3) output provinces, but due to heterogeneous results, its influence in medium-output provinces (group 2) is inconclusive.

Cointegration tests confirm the existence of a long-term relationship among the variables. Energy intensity has a negative and significant impact, while innovation has a positive and significant effect on ETFEE and TFCEE across Iranian provinces. The share of industrial value added in GDP does not significantly influence ETFEE or TFCEE.



تحلیل کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران: کاربرد از تحلیل پوششی داده و مدل توبیت^۱

سمیه اعظمی^۱✉، هاوژین اژند^۲

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: s.azami@razi.ac.ir
۲. کارشناسی ارشد اقتصاد، دانشکده علوم اجتماعی و تربیتی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: havzhinazhand@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
بهبود کارایی سبز به عنوان راهی برای حصول توسعه پایدار نه تنها منافع زیست‌محیطی بلکه امنیت انرژی نیز به همراه دارد. هدف این پژوهش بررسی کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران در فاصله زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۷ است. بدین منظور، ابتدا انتشار دی‌اکسید کربن استان‌های ایران مطابق با هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی و سپس کارایی انرژی اکولوژیکی کل عوامل (ETFEE) و کارایی کربن کل عوامل (TFCEE) مطابق با تحلیل پوششی داده‌ها محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد متوسط ETFEE و TFCEE استان‌های ایران به ترتیب ۴۲/۶۷٪ و ۲۴/۹۸٪ است. تولید تأثیر مثبتی بر ETFEE و TFCEE استان‌های با سهم GDP بالا و سهم GDP پایین دارد. با توجه به ناهمگنی نتایج نمی‌توان ادعا نمود که تولید تأثیر مثبتی بر ETFEE و TFCEE استان‌های با سهم GDP متوسط دارد. نتایج برآورد مدل توبیت حاکی از آن است که شدت انرژی و نوآوری به ترتیب منجر به کاهش و افزایش معنی‌دار شاخص‌های ETFEE و TFCEE می‌شود. ساختار صنعت تأثیر معنی‌داری بر ETFEE و TFCEE ندارد. اصلاح سیاست‌های انرژی، تعویض تجهیزات فرسوده و قدیمی و استفاده از تکنولوژی جدید تولیدی برای کاهش شدت انرژی توصیه می‌شود. همچنین، حمایت از تحقیق و توسعه کمک شایانی به ارتقاء کارایی انرژی و کربن می‌نماید.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸ JEL: Q50, O30, C24, C61.

واژه‌های کلیدی:

کارایی انرژی کل عوامل
اکولوژیکی،
کارایی کربن کل عوامل،
SBM،
DDF،
رگرسیون توبیت.

استناد: اعظمی، سمیه و اژند، هاوژین (۱۴۰۴). تحلیل کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران: کاربرد از تحلیل پوششی داده و مدل توبیت. *نظریه‌های کاربردی اقتصاد*، ۱۲(۳)، ۸۰-۴۹.

DOI: 10.22034/ecoj.2025.66157.3409



حق مؤلف © نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز

^۱ این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد هاوژین اژند با راهنمایی دکتر سمیه اعظمی است.

۱-مقدمه

افزایش تولید با افزایش نهاده‌های تولید امکانپذیر است. یکی از این نهاده‌ها انرژی و عمده مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی است. دو مشکل عمده در خصوص مصرف انرژی؛ امنیت انرژی و انتشار آلاینده‌ها است. همان‌طور که کشورها در مسیر رشد و توسعه قرار گرفتند به آرامی آشکار شد تخریب محیط زیست در حال افزایش است. بهبود کارایی انرژی اولین مرحله برای کاهش اثرات زیست‌محیطی فرایندهای تولیدی و دستیابی به توسعه پایدار است. هدف از بهبود کارایی انرژی تنها منافع زیست محیطی همچون کاهش انتشار CO_2 نیست بلکه دستیابی به رقابت صنعتی و امنیت انرژی نیز هست (پترسن^۱، ۱۹۹۶). کارایی انرژی سبز یعنی کاربرد روش‌ها، فناوری‌ها و سیستم‌های مدیریتی خاص برای تولید کالاها و خدمات سازگار با محیط زیست. از این رو می‌توان گفت که هدف کارایی انرژی سبز، افزایش سودآوری تجاری است به گونه‌ای که به موضوع اصلی محیط زیست و ارتقا کارایی عوامل تاکید دارد (شائو و وانگ^۲، ۲۰۲۳).

با توجه به اهمیت مقوله "توسعه پایدار" جنبه دیگری از کارایی با عنوان "کارایی زیست‌محیطی" مطرح شد؛ تولید کالا و خدمات بیشتر به ازای نهاده‌های معین همراه با CO_2 کمتر. کارایی زیست‌محیطی بر استفاده کارا از منابع و ایجاد آلودگی کمتر تمرکز دارد. چنانچه فعالیت‌های اقتصادی از نظر زیست‌محیطی از کارایی لازم برخوردار نباشند، دستیابی به توسعه پایدار مشکل می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات و ادبیات مربوط به کارایی انرژی به طور قابل توجهی رشد کرده است. کارایی انتشار کربن مستقیم ترین رویکرد کاهش کربن است، اما اغلب با بهره‌وری انرژی اشتباه گرفته می‌شود و به خودی خود توجه تحقیقات کافی را به خود جلب نکرده است.

به‌طور کلی برای اندازه‌گیری کارایی می‌توان از دو روش پارامتری و ناپارامتری استفاده کرد. مهم ترین روش پارامتری تابع مرزی تصادفی است. در این حالت تابع تولید برآورد و با استفاده از آن کارایی تعیین می‌شود. از عمده مشکلات این روش می‌توان به خطای تصریح فرم تابع تولید اشاره کرد. روش ناپارامتری نیز بر پایه مدل‌های بهینه سازی ریاضی استوار است که مهم ترین آنها روش تحلیل پوششی داده‌ها است. در این روش از ابتدای کار، شکل خاصی برای تابع تولید در نظر گرفته نمی‌شود و هدف نه شناخت تابع تولید بلکه تعیین مرز کارایی است که کارایی واحدها نیز با آن مقایسه می‌شود. DEA به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری کارایی نسبی واحدهای تصمیم گیری با ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد استفاده می‌شود و ارتباط قوی با نظریه تولید در اقتصاد دارد.

امروز کشور ایران نه تنها با بحران ناترازی انرژی رو به رو است بلکه همچنین هفتمین منتشرکننده دی‌اکسید کربن در جهان به شمار می‌رود. یکی از راهکارهای غلبه بر این مشکلات بهبود کارایی انرژی و زیست‌محیطی است؛ دستیابی همزمان به رشد و کاهش آلاینده‌ها. افزایش کارایی انرژی نسبت به دیگر راهکارها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. چرا که افزایش کارایی انرژی می‌تواند هم از هدر رفت آن جلوگیری نماید (تأمین امنیت انرژی) و هم از طریق انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای (که از شاخص‌های مهم و رایج کیفیت محیط‌زیست می‌باشند) منجر به بهبود کیفیت محیط‌زیست گردد. هدف این پژوهش تحلیل و بررسی کارایی انرژی اکولوژیکی کل عوامل (ETFEE)^۳ و کارایی کربن

¹ Patterson² Shao & Wang³ Ecological Total Factor Energy Efficiency (ETFEE)

کل عوامل (TFCEE)^۱ استان‌های ایران در فاصله زمانی ۱۳۹۷-۱۳۸۵ است. وجه اشتراک این دو شاخص در نظر گرفتن همه عوامل تولید و نیز انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان تولید نامطلوب است. در شاخص ETFEE تمرکز بر نسبت انرژی هدف به انرژی واقعی و در شاخص TFCEE تمرکز بر نسبت انتشار دی‌اکسید کربن هدف به واقعی است. لذا، ابتدا انتشار دی‌اکسید کربن استان‌های ایران به عنوان تولید نامطلوب مطابق با هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی^۲ محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و مدل SBM شاخص ETFEE و با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و تابع فاصله جهت‌دار شاخص TFCEE محاسبه می‌شود. در پایان، با توجه به اینکه این شاخص‌ها عددی بین صفر و یک را اتخاذ می‌کنند با استفاده از مدل توبیت به بررسی تأثیر شدت انرژی، نوآوری و ساختار صنعت بر ETFEE و TFCEE پرداخته می‌شود. مدل توبیت امکان برآورد ضرایب نا اریب و سازگار را فراهم می‌کند.

این مطالعه چند ویژگی برجسته دارد. اولاً، به تحلیل و بررسی همزمان دو شاخص ETFEE و TFCEE در استان‌های ایران می‌پردازد. وجود دو شاخص ضمن اینکه از دو جنبه کارایی را بررسی می‌کند بلکه همچنین امکان راستی آزمایی نتایج را فراهم می‌کند. ثانیاً، تمرکز بر استان‌های ایران است. در مطالعات استانی علیرغم دشواری محاسبه انتشار دی‌اکسید کربن می‌توان به جزییات بیشتری در مورد استان‌ها رسید. در این پژوهش با استفاده از مدل توبیت به بررسی عوامل مؤثر بر ETFEE و TFCEE پرداخته می‌شود.

سازمان‌دهی مقاله به این صورت است که در ادامه ادبیات موضوع مطرح می‌شود. در این بخش مبانی نظری شاخص‌های کارایی و مطالعات انجام شده در این زمینه ارائه می‌شود و همچنین، به بررسی نقش عوامل مؤثر به کارایی پرداخته می‌شود. روش‌شناسی پژوهش و یافته‌های تجربی به ترتیب موضوع بخش سوم و چهارم است. در بخش سوم روش محاسبه شاخص‌ها ارائه می‌شود و در بخش چهارم نتایج محاسبه شاخص‌های کارایی و برآورد مدل گزارش می‌شود. نتیجه‌گیری و توصیه سیاستی به بخش پنجم اختصاص دارد.

۲- ادبیات تحقیق

۲-۱- کارایی انرژی و کارایی کربن

با توجه به تعریف آژانس بین‌المللی انرژی (IEA^۳)، کارایی انرژی یک راه و روش مدیریت و محدود کردن رشد مصرف انرژی است. کارایی انرژی یک اصطلاح عمومی است و هیچ روش و شاخص اندازه‌گیری منحصر به فردی برای آن وجود ندارد. به طور کلی کارایی انرژی به استفاده کمتر از انرژی برای تولید همان میزان خدمت یا محصول مفید نسبت به قبل اشاره دارد. در بیشتر مطالعات، کارایی انرژی به حداقل مصرف انرژی اشاره دارد و سطح تولید را ثابت در نظر می‌گیرند. این مطالعات کارایی انرژی را از دیدگاه ورودی گرا تعریف می‌کنند. تعریف کارایی انرژی از دیدگاه خروجی گرا به معنای حداکثر خدماتی است که با استفاده از مقدار معینی از ورودی انرژی ساخته شده است (مون و مین^۴، ۲۰۱۷). با توجه به تعداد عامل‌های ورودی، کارایی انرژی می‌تواند به عنوان کارایی تک عامل انرژی و کارایی چند عامل انرژی طبقه‌بندی شود. در کارایی تک عامل انرژی، تنها عامل ورودی انرژی و تنها عامل خروجی تولید ناخالص داخلی است

^۱ Total Factor CO₂ Emission Efficiency (TFCEE)

^۲ Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC)

^۳ International Energy Agency

^۴ Moon & Min

که در آن تاثیر جایگزینی سایر عوامل تولید بر انرژی نادیده گرفته می‌شود که بر میزان صحت کارایی تاثیر می‌گذارد (جارویس و کینگ^۱، ۲۰۲۴).

به‌طور کلی برای اندازه‌گیری کارایی می‌توان از دو روش پارامتری و ناپارامتری استفاده کرد. مهم‌ترین روش پارامتری تابع مرزی تصادفی است. در این حالت تابع تولید برآورد و با استفاده از آن کارایی تعیین می‌شود. از عمده مشکلات این روش می‌توان به خطای تصریح فرم تابع تولید اشاره کرد. روش ناپارامتری نیز بر پایه مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی استوار است که مهم‌ترین آنها روش تحلیل پوششی داده‌ها است. در این روش از ابتدای کار، شکل خاصی برای تابع تولید در نظر گرفته نمی‌شود و هدف نه شناخت تابع تولید بلکه تعیین مرز کارایی است که کارایی واحدها نیز با آن مقایسه می‌شود. DEA به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری با ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد استفاده می‌شود و ارتباط قوی با نظریه تولید در اقتصاد دارد.

در این مطالعه روش هو و وانگ^۲ (۲۰۰۶) برای سنجش کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی دنبال می‌شود. آنها مفهوم کارایی انرژی کل عوامل^۳ را بر اساس روش ارزیابی کارایی ارائه شده توسط فارل^۴ (۱۹۵۷) پیشنهاد کردند. TFEE نسبت ورود نهاده انرژی هدف به نهاده انرژی واقعی، براساس ورودی‌ها و خروجی‌های متعدد است که نشان دهنده شاخص کارایی نسبی برای مصرف انرژی است. آنها شاخص کارایی انرژی کل عامل را به صورت نسبتی از ورودی انرژی هدف (TEI)^۵ به ورودی انرژی واقعی (AEI)^۶ تعریف کردند. ورودی انرژی هدف برابر است با ورودی انرژی واقعی منهای کل تعدیلات (TA)^۷. ورودی انرژی واقعی همیشه بزرگتر یا برابر نهاده انرژی هدف است، بنابراین TFEE کمتر یا برابر ۱ است. لی و هو^۸ (۲۰۱۲) شاخص کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی را که در آن تولید نامطلوب در نظر گرفته می‌شود معرفی می‌کنند. کارایی انرژی برای i در زمان t را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد که کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی نامیده می‌شود زیرا از دیدگاه بهره‌وری کل عوامل و توسعه پایدار با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب ایجاد می‌شود.

$$ETFE = \frac{\text{Target Energy input}(i,t)}{\text{Actual Energy input}(i,t)} \quad (1)$$

$$\text{Target Energy input}(i,t) = \text{Actual Energy input}(i,t) - \text{Total Energy input Slack}(i,t)(i,t) \quad (2)$$

شکاف بین سطح هدف و سطح واقعی مصرف انرژی، مازاد کل انرژی ورودی نامیده می‌شود که به عنوان بخش ناکارآمد از مصرف واقعی انرژی در نظر گرفته می‌شود.

در شاخه مطالعاتی دیگر، محققین کارایی زیست‌محیطی را محاسبه کرده‌اند. کارایی زیست‌محیطی به معنای تولید کالا و ارائه خدمات با به کارگیری انرژی و مواد اولیه کمتری می‌باشد که ضایعات، آلودگی و هزینه کمتری نیز به

¹ Jarvis & King

² Hu & Wang

³ Total Factor Energy Efficiency (TFEE)

⁴ Farrell

⁵ Target Energy Input

⁶ Actual Energy Input

⁷ Total Adjustments

⁸ Li & Hu

دنبال داشته باشد. کارایی زیست محیطی به عنوان یکی از عناصر مهم توسعه پایدار، بیانگر وضعیت تولید آلاینده‌گی از نهاده‌های تولید است. چنانچه فعالیت‌های اقتصادی از نظر زیست محیطی از کارایی لازم برخوردار نباشند، دستیابی به توسعه پایدار مشکل می‌شود. در واقع کارایی زیست محیطی دو جنبه محیطی و اقتصادی را به‌طور همزمان بررسی می‌کند (ایلیاس و همکاران^۱، ۲۰۲۰). کارایی زیست محیطی عبارت است از نسبت حداقل استفاده بالقوه به بالفعل نهاده‌های زیان بار زیست محیطی (رینهارد و همکاران^۲، ۱۹۹۹). از این رو کارایی کل عامل خروجی نامطلوب به شرح زیر است:

$$0 \leq \frac{\text{خروجی نامطلوب هدف}}{\text{خروجی نامطلوب واقعی}} \leq 1 \quad (۳)$$

نسبت انتشار بالقوه کربن به انتشار واقعی کربن به عنوان شاخص عملکرد کربن کل عوامل (TCPI)^۳ تعریف و به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$TFCEE = \frac{\text{Target CO}_2 \text{ Emissions}}{\text{Actual CO}_2 \text{ Emissions}} \quad (۴)$$

۲-۲- عوامل مؤثر بر کارایی انرژی و کارایی کربن

در ادامه، به نقش شدت انرژی، ساختار صنعت و نوآوری بر کارایی پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱- شدت انرژی

شدت انرژی نسبت مصرف نهایی انرژی به تولید ناخالص داخلی است و به این مفهوم اشاره دارد که برای تولید هر واحد پولی کالا و خدمات چقدر انرژی مصرف شده است. کاهش شدت انرژی به معنای حفاظت بیشتر از منابع و محیط زیست، واردات انرژی کمتر و کاهش هزینه‌های تولید است. تحولات شدت انرژی از جنبه سیاستگذاری بسیار مهم بوده و سیاستگذاران را توانمند می‌سازد که نحوه دگرگونی‌های تقاضای انرژی را در قبال دگرگونی‌های سیستم و ساختار اقتصادی بشناسند. همچنین، درک صحیحی از ابزارهای مناسب سیاست‌گذاری‌های حوزه انرژی به دست می‌دهد، زیرا نمایانگر ترکیبی از اثرات دگرگونی‌های ساختاری اقتصاد (نمایان در GDP) و دگرگونی در ترکیب منابع انرژی است. دگرگونی‌های معیار شدت انرژی در طول زمان نشان می‌دهد که فعالیت‌های اقتصادی به سمت انرژی‌بری بیشتر یا انرژی اندوزی حرکت می‌کنند.

۲-۲-۲- ساختار صنعت

وو و همکاران^۴ (۲۰۲۱) عنوان می‌کنند که اینترنت می‌تواند به طور غیر مستقیم کارایی انرژی سبز را از طریق بهبود توانایی نوآوری منطقه‌ای و ارتقاء ساختار صنعتی بهبود بخشد. لی و ما^۵ (۲۰۲۱) نشان می‌دهند که ساختار صنعتی، ساختار انرژی و مقررات زیست محیطی تأثیر منفی و معنی داری بر کارایی انرژی سبز کل عوامل دارند. ما و همکاران^۶ (۲۰۲۱) نشان می‌دهند که کارایی انرژی سبز کل عوامل به طور قابل توجهی توسط عواملی چون ساختار صنعتی،

^۱ Ilyas

^۲ Reinhard et al.

^۳ Total Factor CO₂ Emission Performance Index

^۴ Wu et al.

^۵ Li & Ma

^۶ Ma et al.

نوآوری‌های تکنولوژیکی، ساختار انرژی و سرمایه انسانی بهبود می‌یابد. گائو و همکاران^۱ (۲۰۲۲) نشان می‌دهند دیجیتالی شدن می‌تواند از طریق نوآوری‌های تکنولوژیکی و به روز رسانی ساختار صنعتی، کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود ببخشد. شائو و وانگ (۲۰۲۳) بیان می‌کنند ساختار صنعتی و نوآوری‌های تکنولوژیکی کانال‌های مهمی برای شاخص نوع جدید شهرنشینی هستند که بتواند کارایی انرژی سبز کل عوامل را تحت تأثیر قرار دهد.

۲-۲-۳- نوآوری

هر نو فعالیت علمی، فنی، سازمانی، مالی و تجاری از جمله سرمایه‌گذاری در دانش نوین که عملاً منجر به تولید محصولات و یا فرایندهای فنی جدید یا اصلاح شده شود، فعالیت نوآورانه فنی محسوب می‌شود (شاکری و همکاران^۲، ۱۳۹۴). ابداع و نوآوری موجب تولید کالای نوآورانه می‌شود. نوآوری مانند اختراع باید دارای برنامه‌ریزی باشد. شرکت‌ها با شناخت مشکلات و فرصت‌های پیشرو باید به نوآوری و تولید محصولات خود اقدام کنند. تحقیق و توسعه به عنوان یک اصطلاح جامع، طیف گسترده‌ای از فعالیت‌ها را شامل می‌شود؛ از توسعه فناوری‌های نوین، ابداعات و اختراعات گرفته تا بهبود کمی و کیفی محصولات و خدمات و کاربردهای صنعتی، اقتصادی و اجتماعی آنها که همگی باهدف پاسخگویی به نیازهای فزاینده جوامع بشری انجام می‌شوند. تحقیق و توسعه که معمولاً شامل سه دسته تحقیقات پایه، تحقیقات کاربردی و تحقیقات توسعه‌ای است، بستر نوآوری و پیشرفت فناوری را فراهم می‌کند و در نتیجه به کاهش هزینه‌های تولید، افزایش بهره‌وری شرکت‌ها و انتقال فناوری بین بنگاه‌ها کمک می‌کند (صمدی مقدم و همکاران^۳، ۱۳۹۶). کوزنتس^۴ (۱۹۶۱) معتقد بود که گسترش فعالیت‌های تحقیق و توسعه داخلی در کشورها و افزایش ظرفیت اقتصادی برای جذب فناوری‌های جدید باعث ارتقای سرمایه انسانی و توان تولید افراد می‌گردد و بدین ترتیب توانایی کشورها برای حداکثر کردن محصول با استفاده از همان منابع تولید افزایش می‌یابد. از این دیدگاه، فعالیت‌های تحقیق و توسعه داخلی از طریق استفاده کارآمد از منابع داخلی، معرفی کالاهای سرمایه‌ای جدید و همچنین افزایش ظرفیت انتقال فناوری، توانایی کشورها را برای حداکثر کردن تولید افزایش داده است و کارایی فنی کشورها را بهبود می‌بخشد. براین اساس کشورهای پیشرفته صنعتی، تأسیس نهادهای تحقیق و توسعه و سرمایه‌گذاری بر روی آنها را به موازات انجام سرمایه‌گذاری مستقیم در صنایع، مهم ارزیابی می‌کنند و این امر را عاملی مهم در راستای صنعتی شدن و یکی از ابزارها و سازوکارهای نهادی و بنیادی برای ایجاد محیطی که موجب خلق و توسعه فعالیت‌های فناورانه می‌شود، برمی‌شمردند. درواقع، اهمیت سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه و گسترش واحدهای R&D در کشورهای پیشرفته صنعتی یک مزیت رقابتی محسوب می‌شود. به طوری که با کم‌رنگ شدن مرزهای اقتصادی و گسترش ابعاد رقابت در عرصه تعاملات بین‌المللی، تلاش برای بهبود کارایی فنی عوامل تولید، مهم و قابل توجه است و موفقیت هریک از کشورها برای کسب فناوری برتر به استفاده از دانش فنی، جذب هرچه بیشتر فعالیت‌های تحقیق و توسعه خارجی، اتخاذ سیاست‌های مناسب تجاری و استفاده از نیروی انسانی ماهر و نیمه‌ماهر بستگی خواهد داشت (صمدی مقدم و همکاران، ۱۳۹۶).

¹ Gao et al.

² Shakeri et al.

³ Samadi Moghadam et al.

⁴ Kuznets

۲-۳- پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی بر سنجش کارایی انرژی و کارایی زیست‌محیطی و همچنین شناسایی عوامل مؤثر بر آن تمرکز کرده‌اند. جدول (۱) مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه کارایی انرژی دارد. در این جدول، مطالعات جدید لاتین ۲۰۲۰ به بعد و داخلی ۱۳۹۵ به بعد گزارش شده است.

جدول (۱): مطالعات انجام شده

نویسندگان	کشور مطالعه	دوره زمانی	نتیجه
هائو و همکاران ^۱ (۲۰۲۰)	چین	۲۰۱۶-۲۰۰۵	بدون در نظر گرفتن فساد، کارایی انرژی سبز کل عوامل تحت تأثیر منفی تخصیص نادرست نیروی کار محلی قرار می‌گیرد. کارایی انرژی سبز کل عوامل به طور کلی تحت تأثیر فساد دولتی در مناطق محلی یا مجاور قرار نمی‌گیرد اما در مناطقی که درگیر فساد بالایی هستند تخصیص نادرست سرمایه و نیروی کار اثر بازدارندگی بیشتری بر روی کارایی انرژی سبز کل عوامل دارند.
وو و همکاران (۲۰۲۰)	چین	۲۰۱۶-۲۰۰۵	یک رابطه U شکل بین مقررات زیست‌محیطی و کارایی انرژی سبز کل عوامل وجود دارد. این اثر غیر خطی مقررات زیست‌محیطی بر کارایی انرژی سبز کل عوامل با توجه به نوع تمرکززدایی زیست‌محیطی متفاوت است.
وو و همکاران (۲۰۲۱)	چین	۲۰۱۵-۲۰۰۶	توسعه اینترنت نه تنها کارایی انرژی سبز کل عوامل یک منطقه، بلکه مناطق مجاور را هم می‌تواند بهبود بخشد. همچنین اینترنت می‌تواند به طور غیر مستقیم کارایی انرژی سبز کل عوامل منطقه‌ای را از طریق بهبود توانایی نوآوری منطقه‌ای و ارتقاء ساختار صنعتی بهبود بخشد.
وانگ و ژائو ^۲ (۲۰۲۱)	چین	۲۰۱۷-۲۰۰۳	با استفاده از تابع فاصله جهت‌دار کارایی انرژی سبز کل عوامل تولید برآورد می‌شود. کارایی انرژی سبز کل عوامل رابطه مثبتی با پیشرفت تکنولوژی و مقررات زیست‌محیطی داشته در حالی که رابطه آن با شدت انرژی به طور قابل توجهی منفی است.
لی و ما (۲۰۲۱)	چین	۲۰۱۸-۲۰۰۰	تراکم مالی تأثیری بازدارنده بر کارایی انرژی سبز کل عوامل دارد اما نوآوری تکنولوژیکی به طور قابل توجهی کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود می‌بخشد. کارایی انرژی سبز کل عوامل به وضوح تحت تأثیر اثر متقابل میان نوآوری تکنولوژیکی و تراکم مالی قرار نمی‌گیرد. ساختار صنعتی، ساختار انرژی و مقررات زیست‌محیطی رابطه منفی و معنی داری با کارایی انرژی سبز کل عوامل دارند.
ما و همکاران (۲۰۲۱)	چین	۲۰۱۷-۲۰۰۰	کارایی انرژی سبز کل عوامل به طور قابل توجهی توسط عواملی چون ساختار صنعتی، نوآوری‌های تکنولوژیکی، ساختار انرژی و سرمایه انسانی بهبود می‌یابد.
گائو و همکاران (۲۰۲۲)	چین	۲۰۰۹-۲۰۰۶	سیاست آزمایشی شهر کم کربن (LCC) ^۳ می‌تواند به طور قابل توجهی کارایی انرژی سبز کل عوامل را در سطح شهری بهبود ببخشد. سیاست آزمایشی LCC می‌تواند بهره‌وری انرژی را از طریق نوآوری‌های سبز تحریک کند.

^۱ Hao et al.^۲ Wang & Zhao^۳ Low Carbon City

یک اثر هم‌افزایی بین مقررات زیست‌محیطی و سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی وجود دارد. ارتباط بین آن‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی کارایی انرژی سبز کل عوامل را در سطح شهری بهبود بخشد. سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی هنگامی که میزان مقررات زیست‌محیطی پایین است، تأثیر چندانی بر روی کارایی انرژی سبز کل عوامل ندارد. در حالی که می‌تواند کارایی انرژی سبز کل عوامل را هنگامی که میزان مقررات زیست‌محیطی زیاد است، به طور قابل توجهی بهبود بخشد.	۲۰۱۹-۲۰۰۴	چین	گائو و همکاران ^۱ (۲۰۲۲)
استراتژی پهنای باند اینترنت کارایی انرژی سبز کل عوامل را به طور متوسط ۲/۶۱ درصد بهبود بخشیده و تأثیر آن بر کارایی انرژی سبز کل عوامل در بین شهرها با ویژگی‌های متفاوت ناهمگن است.	۲۰۱۸-۲۰۰۹	چین	ون و همکاران ^۱ (۲۰۲۲)
سیاست آزمایشی تجارت کربن می‌تواند شرکت‌ها را به سرمایه‌گذاری در واحد تحقیق و توسعه تشویق کند، سطح نوآوری در فناوری را افزایش دهد و در نهایت به طور چشم‌گیری کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود بخشد.	۲۰۱۷-۲۰۰۶	چین	ژو و چی ^۲ (۲۰۲۲)
سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی کارایی انرژی سبز کل عوامل را افزایش می‌دهد. نتایج اثر آستانه‌ای نشان داد که تأثیر غیر خطی سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی بر کارایی انرژی سبز کل عوامل به کیفیت سازمانی وابسته است.	۲۰۱۷-۲۰۰۶	چین	رن و همکاران ^۳ (۲۰۲۲)
دیجیتالی شدن می‌تواند از طریق نوآوری‌های تکنولوژیکی و به روز رسانی ساختار صنعتی، کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود ببخشد.	۲۰۱۸-۲۰۱۱	چین	گائو و همکاران (۲۰۲۲)
تأثیر عدم یکپارچگی بازار قیمت منابع انرژی بر روی کارایی انرژی سبز کل عوامل یک منحنی به شکل U معکوس است و کاهش میزان عدم یکپارچگی بازار قیمت منابع انرژی در جهت بهبود کارایی انرژی سبز کل عوامل مفید است. در واقع به ازای هر ۱ درصد افزایش در عدم یکپارچگی بازار قیمت منابع انرژی در چین، کارایی انرژی سبز کل عوامل حدود ۰/۳۹ درصد کاهش خواهد یافت.	۲۰۰۴-۲۰۱۸	چین	گوا و لیو ^۴ (۲۰۲۲)
در مقایسه با کارایی انرژی کل عوامل صنعتی، کارایی انرژی سبز کل عوامل صنعتی تأثیر بیشتری بر کاهش آلودگی ناشی از ریزگردها دارد. کارایی انرژی سبز کل عوامل صنعتی نه تنها می‌تواند آلودگی ریزگردها را در مناطق محلی به طور چشم‌گیری کاهش دهد بلکه تأثیر مثبتی بر کاهش آلودگی ریزگردها در مناطق مجاور نیز دارد. مقررات زیست‌محیطی و ارتقاء صنعتی محرک‌های حیاتی برای کاهش آلودگی ناشی از ریزگردها هستند.	۲۰۰۳-۲۰۱۷	چین	گائو و یوان ^۵ (۲۰۲۲)
توسعه نوع جدید شهرنشینی به طور قابل توجهی کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود بخشیده است. ساختار صنعتی و نوآوری‌های تکنولوژیکی کانال‌های مهمی برای شاخص نوع جدید شهرنشینی هستند که بتواند کارایی انرژی سبز کل عوامل را تحت تأثیر قرار دهد.	۲۰۰۲-۲۰۱۸	چین	شائو و وانگ (۲۰۲۳)

¹ Wen et al.² Zhou & Qi³ Ren et al.⁴ Guo & Liu⁵ Gao & Yuan

ژو و همکاران ^۱ (۲۰۲۳)	چین	۲۰۱۸-۲۰۰۶	فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات با کارایی انرژی سبز کل عوامل همبستگی مثبت دارد. ساختار انرژی و شدت سرمایه گذاری تحقیق و توسعه دو عامل مؤثر بر رابطه بین فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات و کارایی انرژی سبز کل عوامل است.
صادقی شاهدانی و خوشخوی ^۲ (۱۳۹۵)	بخش خانگی ایران		زیرساخت‌های دولت الکترونیک، توسعه کنترهای هوشمند و تجهیزات هشدار مصرف انرژی در منازل و توسعه الگوهای معماری بومی متناسب با شرایط اقلیمی مناطق مختلف کشور، وضع مالیات بر مصرف انرژی در رابطه با مؤلفه‌های فنی-تکنیکی، دارای بیشترین اثر بر کارایی انرژی در بخش مذکور می‌باشند.
صفری و گلی ^۳ (۱۳۹۵)	استان‌های ایران	۱۳۸۵-۱۳۹۴	صنعتی شدن، تولید حقیقی سرانه و قیمت انرژی اثر مثبت و معنی‌داری و شهرنشینی و چگالی جمعیتی اثر منفی و بی معنی بر کارایی انرژی دارد.
ناظمی و همکاران ^۴ (۱۳۹۸)	استان‌های ایران	۱۳۸۸-۱۳۹۲	با تنظیم سیاست‌های حمایتی از بخش‌های خاص اقتصادی و یا گسترش منابع انرژی، به جانشینی منابع انرژی تجدیدپذیر به جای فسیلی مبادرت ورزیده و از طریق ساختار اقتصاد به بهبود کارایی انرژی در استان‌های کشور کمک نمایند.
نظری و نظری ^۵ (۱۳۹۹)	کشورهای بریکس (نوظهور)، تازه صنعتی شده جنوب شرق آسیا و ایران	۲۰۱۲	چهار کشور برزیل، روسیه، آفریقای جنوبی و سنگاپور در تمام سال‌های مورد مطالعه دارای کارایی انرژی پویا هستند اما متوسط کل دوره برای سایر کشورها (چین، هند، اندونزی، تایلند، کره جنوبی، مالزی و ایران) نشانگر عدم کارایی است. کشور ایران با ۱۱٪ بالاترین عدم کارایی انرژی پویا را در بین کشورهای مورد مطالعه دار است.
جلایری و همکاران ^۶ (۱۴۰۱)	صنایع انرژی بر استان اصفهان	۱۳۹۶	میانگین کارایی زیست‌محیطی به نسبت قابل توجهی پایین‌تر از میانگین کارایی فنی بنگاه است. با توجه به میانگین کارایی زیست‌محیطی محاسبه شده پیشنهاد می‌شود که استانداردهای زیست‌محیطی متناسب با هر صنعت تدوین گردد.
سالم و همکاران ^۷ (۱۴۰۱)	صنایع استان‌های ایران	۱۳۸۵-۱۳۹۷	زیر ساخت‌های حمل و نقل اثر غیر خطی بر کارایی انرژی دارد. هنگامی که لگاریتم تولید ناخالص داخلی حقیقی بالاتر از آستانه دوم (۱۵/۶۶) باشد، زیرساخت‌های حمل و نقل کارایی انرژی را به صورت معناداری ارتقا می‌دهند و هنگامی که لگاریتم تولید ناخالص داخلی کمتر از آستانه اول (۱۴/۶۴) باشد، گسترش این نوع زیرساخت‌ها، کارایی انرژی صنعت را کاهش می‌دهد. علاوه بر این پیشرفت تکنولوژی و قیمت انرژی نیز اثر مثبت و معنی‌داری بر کارایی انرژی صنعت دارند.
زروکی و مقدسی ^۸ (۱۴۰۱)	ایران	۱۳۵۰-۱۳۹۶ و ۱۳۶۷-۱۳۹۶	در بلندمدت، در سطح کل اقتصاد افزایش و کاهش قیمت انرژی با اثری مستقیم بر کارایی انرژی همراه می‌باشد. در بخش خانگی و صنعت کاهش قیمت انرژی با اثری مستقیم بر کارایی انرژی همراه بوده ولی اثر معنی‌داری از افزایش قیمت انرژی

¹ Zhu et al.² Sadeghi Shahedani & Khosh Khoy (2016)³ Safari & Goli (2016)⁴ Nazemi et al. (2019)⁵ Nazari & Nazari (2020)⁶ Jalayeri et al. (2022)⁷ Salem et al. (2022)⁸ Zaroeki & Moghadasi (2022)

بر کارایی انرژی در این دو بخش مشاهده نشد. کارایی انرژی در بخش تجاری نیز از افزایش و کاهش در قیمت انرژی اثر معنی‌داری نمی‌پذیرد. همچنین در سطح کل اقتصاد و در بخش‌های یاد شده نامتقارنی در اثرگذاری قیمت انرژی تایید شد.			
با افزایش رانت منابع، کارایی انرژی کاهش خواهد یافت.	۱۹۹۸-۲۰۱۹	کشورهای تحصیل‌دار ^۱	غلامرضا نژاد ^۲ (۱۴۰۲)
میانگین کارایی انرژی کل استان‌های ایران در دوره مورد نظر تقریباً ۰/۴ می‌باشد. بیشترین میزان متوسط کارایی انرژی مربوط به استان‌های هرمزگان، تهران، بوشهر، آذربایجان و کرمان و کمترین آن نیز مربوط به خراسان شمالی، خراسان جنوبی، چهارمحال بختیاری، سیستان و بلوچستان و لرستان می‌باشد.	۱۳۸۷-۱۳۹۰	صنایع بزرگ استان‌های ایران	آذر ^۳ (۱۴۰۳)
کارایی انرژی دارای همبستگی فضایی در کشورهای مورد مطالعه بوده و نتایج تجربی از وجود اثرات سرریز کیفیت حکمرانی بر کارایی انرژی حمایت می‌کند. تأثیر مستقیم کیفیت حکمرانی بر کارایی انرژی مثبت بوده هر چند این اثر از نظر آماری معنی‌دار نبوده اما اثرات سرریز این متغیر بر کارایی انرژی دارای اثر مثبت و معنی‌داری بوده است.	۲۰۲۰-۲۰۲۲	۸۹ کشور منتخب	شیرافکن لمسو و جلائی ^۴ (۱۴۰۳)
نااطمینانی سیاست اقتصادی در تمامی چندک‌های ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵، ۰/۹۵ و تأثیر منفی بر رشد سبز دارد، در حالی که مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و کیفیت نهادی، رشد سبز را افزایش می‌دهند. تجارت و سرمایه تأثیر مثبت بر رشد سبز داشته است، در حالی که اشتغال تأثیر منفی بر آن داشته است.	۱۳۸۱-۱۳۹۹	ایران	کریمی و تکانلو و همکاران ^۵ (۱۴۰۳)
یارانه برای انرژی‌های تجدیدناپذیر اثری منفی و یارانه برای انرژی‌های تجدیدپذیر اثری مثبت بر عملکرد محیط‌زیست دارند. همچنین افزایش در نسبت یارانه برای انرژی‌های تجدیدناپذیر به یارانه انرژی‌های تجدیدپذیر با اثری منفی بر عملکرد محیط‌زیست همراه است.	۲۰۱۰-۲۰۲۰	منتخبی از کشورهای جهان	جعفری صمیمی و همکاران ^۶ (۱۴۰۳)

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱)، ادبیات در محاسبه سنجش کارایی بر دو روش تحلیل پوششی داده‌ها و تابع مرزی تصادفی متمرکز است. بیشتر مطالعات بر روش تحلیل پوششی داده‌ها متمرکز است. همچنین، در برآورد تأثیر عوامل مؤثر بر کارایی، مدل‌های رگرسیونی و روش برآورد متفاوت به‌کاررفته است. برخی از اقتصاد سنجی فضایی، برخی اقتصاد سنجی پانل و برخی توبیت متمرکز بوده‌اند. مطابق با جدول (۱)، عوامل تأثیرگذار بر کارایی انرژی و زیست‌محیطی عبارتند از: شدت انرژی، نوآوری، فناوری اطلاعات و ارتباطات، دیجیتالی شدن، توسعه اینترنت، سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی، مقررات زیست‌محیطی، شهرنشینی و ساختار صنعتی.

^۱ کشورهای دارای منابع طبیعی که سهم بالایی از درآمدهایشان حاصل از فروش این منابع است و کشورهای غیرتحصیل‌دار

^۲ Gholamnejad (2023)

^۳ Azar (2024)

^۴ Shirafkan & Jalqei (2024)

^۵ Karimi Takanlo et al. (2024)

^۶ Jafari Samimi et al. (2024)

هدف پژوهش حاضر تحلیل و بررسی کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران است. وجه اشتراک این دو شاخص در نظر گرفتن همه عوامل تولید و همچنین، در نظر گرفتن انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان تولید نامطلوب است. با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و مدل SBM کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و تابع فاصله جهت‌دار کارایی کربن کل عوامل محاسبه می‌شود. در پایان، با استفاده از مدل توبیت به بررسی تأثیر شدت انرژی، نوآوری و ساختار صنعت بر کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل پرداخته می‌شود. این مطالعه چند ویژگی برجسته دارد. اولاً، به تحلیل و بررسی همزمان این دو شاخص در استان‌های ایران می‌پردازد. وجود دو شاخص ضمن اینکه از دو جنبه کارایی را بررسی می‌کند بلکه همچنین امکان راستی آزمایی نتایج را فراهم می‌کند. ثانیاً، تمرکز بر استان‌های ایران است. در مطالعات استانی علیرغم دشواری محاسبه انتشار دی‌اکسید کربن می‌توان به جزییات بیشتری در مورد استان‌ها رسید. در این پژوهش با استفاده از مدل توبیت به بررسی عوامل مؤثر بر کارایی پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه شاخص کارایی عددی بین صفر و یک است مدل توبیت امکان برآورد ضرایب نااریب و سازگار را فراهم می‌کند.

۳- روش‌شناسی تحقیق

کارایی یک مفهوم نسبی است که با مقایسه عملکرد واقعی و عملکرد ایده آل بدست می‌آید. می‌توان گفت که کارایی به نحوه بهره‌گیری از منابع توجه دارد و میزان استفاده مفید از منابع را نشان می‌دهد (یوسفی حاجی‌آباد^۱، ۱۳۹۵). برای ارزیابی یک بنگاه، ابتدا باید مرز کارایی بنگاه شناسایی شود و بر مبنای فاصله بنگاه از وضعیت ایده‌آل، میزان عدم کارایی و به تبع آن کارایی مشخص شود. تحلیل پوششی داده‌ها یک روش برنامه‌ریزی خطی برای ارزیابی کارایی واحد تصمیم‌گیرنده (DMU) است.

۳-۱- تحلیل پوششی داده‌ها و مدل SBM^۲: کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی

DEA که بر اساس مطالعه فارل (۱۹۵۷) ساخته شده است، یک روش خوب برای ارزیابی کارایی نسبی مجموعه‌ای از موجودیت‌های قابل مقایسه توسط برخی از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی خاص است (ژو و همکاران، ۲۰۰۸). مدل SBM توسط تون^۳ (۲۰۰۱) معرفی شده و از مدل‌های اصلی CCR-DEA (چارنز و همکاران^۴، ۱۹۷۸) و BCC-DEA (بنکر و همکاران^۵، ۱۹۸۴) است. فرایند تولیدی را که در آن هم خروجی مطلوب و هم نامطلوب تولید می‌شود را در نظر بگیرید. فرض کنید که $X \in R_+^m$ ، $Y^g \in R_+^{n_1}$ و $Y^b \in R_+^{n_2}$ به ترتیب بردار ورودی‌ها، خروجی مطلوب و نامطلوب است. تکنولوژی تولید به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$T = \{(x, y^g, y^b) : x \text{ can produce } (y^g, y^b)\} \quad (5)$$

به منظور مدل‌سازی منطقی یک فرآیند تولید که در آن خروجی‌های مطلوب و نامطلوب به طور مشترک تولید می‌شوند، فار و همکاران (۱۹۸۹) دو فرض را در مورد فناوری تولید پیشنهاد کردند.

$$(i) \text{ If } (K, L, E, Y, C) \in T \text{ and } 0 \leq \theta \leq 1, \text{ then } (K, L, E, \theta Y, \theta C) \in T, \quad (6)$$

¹ Yosefi Hajiabad (2016)

² Slack- Based Measure Model

³ Tone

⁴ Charnes et al.

⁵ Banker et al.

(ii) If $(K, L, E, Y, C) \in T$ and $C = 0$, then $E = 0$

فرض i بیان می کند هزینه فرصت کاهش خروجی نامطلوب معادل کاهش خروجی مطلوب است. مطابق با فرض ii خروجی نامطلوب همراه با خروجی مطلوب تولید می شود. بنابراین، اگر تولید نامطلوب به صفر کاهش یابد تولید مطلوب نیز به صفر کاهش می یابد. مجموعه امکان تولید که مفروضات فوق الذکر را برآورده می کند را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P(x) = \{(y^g, y^b): X \geq x, y^g \leq Y^g \lambda, y^b \geq Y^b \lambda, \lambda \geq 0, X > 0, Y^g > 0, Y^b > 0\} \quad (7)$$

که در آن λ بردار مقادیر ثابت است که وزن هر DMU را نشان می دهد. نامعادلات ورودی و خروجی مطلوب دلالت بر این دارد که ورودی و خروجی مطلوب اکیداً قابل دسترس هستند. با در نظر گرفتن نامعادلات خروجی نامطلوب، خروجی مطلوب و نامطلوب به طور ضعیفی قابل دسترس هستند. نامعادلات $Y^g > 0$ و $Y^b > 0$ با این فرض که خروجی مطلوب و نامطلوب مشترکاً صفر هستند مطابقت دارند. این تعریف با بازده ثابت به فناوری مقیاس مطابقت دارد. مطابق با تکنولوژی تولید با بازدهی ثابت نسبت به مقیاس، کوپر و همکاران^۱ (۲۰۰۶) مدل CRS-SBM با خروجی های نامطلوب را برای محاسبه کارایی فنی یک سیستم تولیدی که در آن خروجی های مطلوب و نامطلوب به طور مشترک تولید می شود پیشنهاد کردند. مسئله برنامه نویسی کسری حل شده توسط مدل CRS-SBM با خروجی های نامطلوب برای منطقه i به شرح زیر است:

$$\min_{\lambda, s^-, s^g, s^b} \rho = \frac{1 - (1/m) \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + (1/n_1 + n_2) (\sum_{r=1}^{n_1} \frac{(s_r^g)}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{n_2} \frac{(s_r^b)}{y_{r0}^b})} \quad (8)$$

$$\text{subject to } x_0 = X\lambda + s^- \quad (9)$$

$$y_0^g = Y^g \lambda - s^g \quad (10)$$

$$y_0^b = Y^b \lambda + s^b \quad (11)$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, X > 0, Y > 0, \quad (12)$$

که هر منطقه دارای m ورودی، n_1 خروجی خوب و n_2 خروجی بد است؛ X ، Y^g و Y^b به ترتیب ماتریس ورودی، خروجی خوب و خروجی بد است، در حالی که همه X ، Y^g و Y^b اکیداً بزرگتر از صفر هستند؛ s^- ، s^g و s^b به ترتیب ماتریس مازاد ورودی، مازاد خروجی خوب و مازاد خروجی بد است؛ و λ یک بردار ثابت است. معادله (۹) قابل دسترس بودن اکید ورودی ها را وضع می کند. معادله (۱۰) فرض قابل دسترس بودن اکید خروجی مطلوب را تأمین می کند. معادله (۱۱) نشان می دهد که خروجی نامطلوب به طور ضعیفی قابل دسترس هستند. نامعادلات $Y^g > 0$ و $Y^b > 0$ نشان می دهند که خروجی های مطلوب و نامطلوب مشترکاً صفر هستند و خروجی نامطلوب محصول فرعی خروجی مطلوب است. مقادیر به دست آمده ρ امتیاز کارایی فنی کلی برای o امین DMU است. کارایی انرژی منطقه i در زمان t را می توان به صورت زیر تعریف کرد، که کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی نامیده می شود زیرا از دیدگاه بهره وری کل عوامل و توسعه پایدار با در نظر گرفتن خروجی های نامطلوب ایجاد می شود.

$$ETFEE(i, t) = \frac{\text{Target energy input}(i, t)}{\text{Actual energy input}(i, t)} \quad (13)$$

¹ Cooper et al.

امتیاز ETFEE همیشه بین صفر تا یک است. اگر انرژی ورودی هدف برابر با سطح واقعی باشد، ETFEE یک است که نشان‌دهنده بالاترین سطح بازده مصرف انرژی است. اگر انرژی ورودی واقعی بسیار بالاتر از هدف باشد، این شاخص به صفر نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده کارایی بسیار پایین است.

۳-۲- تحلیل پوششی داده‌ها و تابع فاصله جهت‌دار^۱: شاخص کارایی کرین کل عوامل

فرض می‌شود هر واحد تولیدی انرژی (E)، سرمایه (K) و نیروی کار (L) را به عنوان نهاده برای تولید ستانده مطلوب (Y) و ستانده نامطلوب (C) به کار می‌گیرد. تکنولوژی تولید در حالت کلی به صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود:

$$T = \{(K, L, E, Y, C); K, L, E \text{ می‌تواند } Y \text{ و } C \text{ را تولید کند}\} \quad (14)$$

مطابق با فار و گراسکوپ^۲ (۲۰۰۳) فرض می‌شود تکنولوژی تولید اصول موضوعه استاندارد نظریه تولید را تأمین می‌کند. یک مجموعه بسته است و با ورودی‌های محدود تنها می‌توان خروجی‌های محدود را تولید کرد. علاوه بر این، بکارگیری نهاده‌ها (ورودی)، تولیدات (خروجی) مطلوب را همراه با تولیدات نامطلوب فراهم می‌آورد. برای آنکه مدل‌سازی مجموعه امکانات تولیدی منطقی باشد لازم است فرض‌های رابطه (۶) رعایت شود. در ادامه با استفاده از تکنیک DEA به تصریح مرز تولید پرداخته می‌شود. تکنولوژی تولید زیست‌محیطی را برای N واحد تصمیم‌گیری با فرض بازدهی ثابت نسبت به مقیاس را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد: (ژو و همکاران، ۲۰۱۲)

$$T = \left\{ (K, L, E, Y, C): \sum_{n=1}^N z_n K_n \leq K, \sum_{n=1}^N z_n L_n \leq L, \right. \\ \left. \sum_{n=1}^N z_n E_n \leq E, \sum_{n=1}^N z_n Y_n \geq Y, \sum_{n=1}^N z_n C_n = C, z_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \right\} \quad (15)$$

Z_n شدت تأثیر گذاری DMU $\ln$ در تعیین تصویر کارا برای DMU تحت ارزیابی است. برای ارزیابی یک DMU باید فاصله آن تا مرز مجموعه T در رابطه (۳) محاسبه شود. اگر این DMU روی مرز مجموعه کارا باشد، کارا است و در غیر این صورت ناکارا است. برای محاسبه DMU تحت ارزیابی تا مرز کارا از NDDF استفاده می‌شود. برخلاف روش شعاعی که در آن همه ورودی‌ها یا افزایش همه خروجی‌ها به نسبت یکسان صورت می‌گیرد، در روش غیرشعاعی مبتنی بر NDDF هر ورودی و یا خروجی به نسبت خاصی کاهش و یا افزایش می‌یابد. با این فرض که DMU تحت ارزیابی به صورت (K, L, E, Y, C) است، مدل مربوطه در رابطه (۱۶) خلاصه می‌شود:

$$\bar{D}(K, L, E, Y, C; g) = \max w_K \beta_K + w_L \beta_L + w_E \beta_E + w_Y \beta_Y + w_C \beta_C \quad (16)$$

$$s. t. \sum_{n=1}^N z_n K_n \leq K_n' - \beta_K g_K$$

$$\sum_{n=1}^N z_n L_n \leq L_n' - \beta_L g_L$$

$$\sum_{n=1}^N z_n E_n \leq E_n' - \beta_E g_E$$

$$\sum_{n=1}^N z_n Y_n \geq Y_n' - \beta_Y g_Y$$

$$\sum_{n=1}^N z_n C_n = C_n' - \beta_C g_C$$

$$z_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N$$

$$\beta_K, \beta_L, \beta_E, \beta_Y, \beta_C \geq 0$$

که در آن $W = (w_K, w_L, w_E, w_Y, w_C)^T$ یک بردار وزنی نرمال شده است که در مقادیر ورودی و خروجی ضرب می‌شود. این وزن‌ها میزان اهمیت ورودی و خروجی را در رسیدن به مرز کارا نشان می‌دهد. $g = (-g_K, -g_L, -g_E, g_Y, -g_C)$ بردار جهت است و جهت رسیدن به مرز کارا را نشان می‌دهد. علامت منفی در این بردار

¹ Directional Distance Function

² Fare & Grosskopf

به کاهش در نهاده‌ها یا محصولات نامطلوب اشاره دارد. $\beta = (-\beta_K, -\beta_L, -\beta_E, \beta_Y, -\beta_C)^T \geq 0$ بردار مقیاسی است و بیانگر آن است که در جهت مؤلفه به چه میزان حرکت می‌کنیم (ژانگ و چوی^۱، ۲۰۱۳). اگر $\vec{D}(K, L, E, Y, C: g) = 0$ باشد بدان مفهوم است که واحد تحت ارزیابی کارا است. بر اساس معادله (۱۷) می‌توان شاخص بهره‌وری را تعریف نمود. نسبت شدت انتشار بالقوه کربن به شدت انتشار واقعی کربن به عنوان شاخص عملکرد زیست‌محیطی کل عوامل (TFCEE)^۲ تعریف و به صورت زیر فرموله می‌شود (ژو و همکاران، ۲۰۱۲).

$$TFCEE = \frac{(C - \beta_C^* C) / (Y + \beta_Y^* Y)}{C/Y} = \frac{1 - \beta_C^*}{1 + \beta_Y^*} \quad (17)$$

که در آن β_C^* و β_Y^* از جواب بهینه مدل (۱۶) بدست می‌آیند. TFCEP در معادله (۱۷) بیشترین شدت کاهش ممکن کربن را اندازه‌گیری می‌کند و می‌تواند کارایی واحد تصمیم‌گیری را در طول یک دوره زمانی اندازه‌گیری کند.

۳-۳- تحلیل رگرسیون توبیت

مدل پایه پژوهش به صورت رابطه (۱۸) تصریح می‌شود.

$$\log Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \log X_{1it} + \alpha_2 \log X_{2it} + \alpha_3 \log X_{3it} + \alpha_i + \gamma_t + V_{it} \quad (18)$$

Y_{it} متغیر وابسته و X_{it} متغیرهای توضیحی است. i و t به ترتیب بیانگر مقطع (استان) و زمان است. α_i و γ_t به ترتیب اثرات ثابت مقطعی (استانی) و زمانی (سال) و V_{it} جمله اختلال است. در اقتصادسنجی توابع و معادلاتی وجود دارند که در آنها متغیر وابسته از بالا یا پایین بریده (محدود) شده است. این مدل‌ها، به افتخار جیمز توبین^۳ (۱۹۵۸) که برای اولین بار این تکنیک را برای تخمین معادلات رگرسیونی مخارج صرف شده برای خرید کالاهای بادوام به کار بسته بود به نام توبیت در نوشتارهای اقتصادسنجی دیده می‌شود. در این حالت متغیر وابسته به شرطی قابل مشاهده است که مقادیر آن از حد خاصی بالاتر یا پایین‌تر باشد. اینگونه متغیرها را در اقتصادسنجی اصطلاحاً متغیرهای سانسور شده می‌نامند. در واقع مدل توبیت یا مدل داده‌های محدود نشان دهنده مدل رگرسیونی است که در آن دامنه متغیر وابسته به طرق مختلف محدود شده و متغیر وابسته تنها برای قسمتی از دامنه‌اش قابل مشاهده می‌باشد و زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که تعداد زیادی از مشاهدات متغیر وابسته دارای مقدار صفر باشد (بازوق، ۱۳۹۰). برای بررسی اثرات متغیرها بر مقادیر کارایی، رایجترین رگرسیون، رگرسیون توبیت است. از آنجایی که کارایی انرژی بین صفر تا ۱ است (کران بالای یک و کران پایین صفر) که متغیر وابسته از بالا و پایین محدود است، برآورد پارامتری با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی، تورش‌دار و ناسازگار خواهد شد. این امر ناشی از فروض اساسی روش برآورد OLS است. در این قسمت از روش حداکثر درست‌نمایی (ML^۴)، برای تخمین ضرایب رگرسیونی در یک مدل سانسور شده استفاده خواهد شد.

$$y^* = \alpha_i + \beta x_{it} + \mu_{it} \quad (19)$$

در مدل توبیت پانلی^۵ فرایند تولید داده‌ها به صورت زیر می‌باشد:

¹ Zhang & Choi

² Total Factor CO2 Emission Performance Index

³ Tobin

⁴ Maximum Likelihood

⁵ Panel Tobit Model

$$y_{it} = \begin{cases} y_i^* & y_i^* > 0 \\ 0 & y_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

در معادلات بالا n تعداد مشاهدات است؛ y_{it} متغیر وابسته است. y_i^* یک متغیر تصادفی غیر قابل مشاهده یا متغیر پنهان می‌باشد. X_{it} بردار متغیرهای برونزا است که $K \times 1$ است، β یک بردار $K \times 1$ از پارامترهای مجهول است؛ α عرض از مبدأ و μ_{it} خطای تصادفی (جز اخلاص) است که دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس ثابت δ^2 می‌باشد. در مدل توبیت پانلی تابع چگالی احتمال برای متغیر وابسته y به صورت زیر می‌باشد.

$$f(y_{it}|x_{it}; \theta) = \begin{cases} 0 & y_{it} < 0 \\ \phi\left(-x_{it}\frac{\beta}{\sigma_u}\right) & \text{if } y_{it} = 0 \\ \vartheta\left(\frac{(y_{it}-x_{it}\beta)}{\sigma_u}\right) & \text{if } y_{it} > 0 \end{cases} \quad (21)$$

که ϕ و ϑ به ترتیب توابع توزیع تجمعی و چگالی احتمال نرمال می‌باشند. در مطالعه حاضر، الگوی (۱۸) برای بررسی تأثیر نقش شدت انرژی و نوآوری بر کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران برآورد می‌شود.

$$\log E_{it} = \beta_0 + \beta_1 \log E I_{it} + \beta_2 \log R D_{it} + \beta_3 \log A S_{it} + \alpha_i + Y_t + u_{it} \quad (22)$$

E کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل است. EI شدت انرژی، RD نوآوری، AS ساختار صنعت است.

۳-۴- داده

در این مطالعه از داده استان‌های ایران در فاصله زمانی ۱۳۹۷-۱۳۸۵ استفاده می‌شود. متغیرهای مورد نیاز که باید داده آنها در این پژوهش جمع‌آوری گردند عبارتند از؛ تولید (ستاده مطلوب)، سرمایه، نیروی کار، حامل‌های انرژی، مخارج تحقیق و توسعه و سهم ارزش افزوده بخش صنعت از تولید ناخالص داخلی. جدول (۲) گزارشی از متغیرهای الگو و منبع گردآوری اطلاعات هر متغیر ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه متغیر وابسته انتشار دی‌اکسید کربن است و دسترسی به این داده به تفکیک استانی وجود ندارد لذا ابتدا باید مصرف حامل‌های انرژی برای هر استان استخراج شود و سپس با استفاده از ضرایب انتشار هر حامل، انتشار دی‌اکسید کربن مربوط به آن حامل محاسبه شود. استخراج داده مصرف حامل‌های انرژی به دلیل وجود ۳۰ استان و تعداد چند حامل فرایند زمان‌بری است. حامل‌های انرژی گاز طبیعی، گاز مایع، نفت سفید، بنزین، نفت گاز و نفت کوره است. متغیر دیگر که در این پژوهش استفاده شده شدت انرژی است. شدت انرژی استانی از تقسیم مصرف انرژی کل استانی بر تولید ناخالص استانی بدست آمده است.

جدول (۲): متغیرها و منبع داده‌ها

متغیر	تعریف	واحد	منبع
نیروی کار	تمام افراد ۱۵ ساله و بیش تر (حداقل سن تعیین شده)	نفر	مرکز آمار ایران
سرمایه	سرمایه گذاری عبارت است از تغییرات ایجاد شده در اموال سرمایه‌ای (مجموع ارزش خرید یا تحصیل و هزینه تعمیرات اساسی اموال سرمایه‌ای منهای ارزش فروش یا انتقال اموال سرمایه‌ای) طی دوره آماری	میلیون ریال	مرکز آمار ایران
تولید	تهیه کالا و خدمات مورد نیاز با استفاده از منابع و امکانات موجود	میلیون ریال	مرکز آمار ایران

مصرف انرژی	مقدار انرژی مصرف شده عبارت است از مقدار انواع سوخت مصرف شده شامل (نفت سفید، گازوئیل، گاز مایع، گاز طبیعی، بنزین، نفت کوره، زغال سنگ، زغال چوب و مقدار برق خریداری شده	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
نفت سفید	یکی از ترکیبات نفتی و مواد سوختی است. نفت سفید در گذشته کاربرد گسترده‌ای در بخش خانگی به عنوان سوخت وسایل گرمایشی و پخت‌وپز داشت که امروزه در بسیاری از نقاط با گاز شهری و گاز مایع جایگزین شده است	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
بنزین	ماده‌ای شفاف و قابل اشتعال از مشتقات نفت خام است که بیشتر به عنوان سوخت در موتورهای اشتعال جرقه‌ای و موتورهای درون‌سوز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنزین محتوی مجموعه‌ای از مواد آلی مثل هیدروکربن‌های سبک دارای ۴ تا ۱۲ اتم کربن می‌باشد.	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
نفت کوره	نفتی است که در مراحل پالایش نفت خام پس از نفتا، بنزین و نفت سفید به دست می‌آید و چون سیاه‌رنگ است به نام نفت سیاه نیز خوانده می‌شود. این ماده ارزان‌ترین ماده سوختنی برای کوره‌ها، حمام‌ها و تنور نانوایی‌ها، موتورهای دیزلی دریایی و برخی نیروگاه‌ها است	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
نفت گاز	نفت‌گاز یا سوخت دیزل به عنوان سوخت موتورهای دیزل و تأسیسات حرارتی به کار می‌رود. محدوده هیدروکربن‌های آن بین C14-C20 و حتی C25 با دامنه نقطه جوش ۳۸۵-۲۵۰ درجه سلسیوس است.	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
گاز مایع	گاز مایع یا ال‌پی‌جی به دو گاز هیدروکربنی بوتان و پروپان یا ترکیب آنها گفته می‌شود که برای کاربردهای گرمایشی، به عنوان سوخت وسایل نقلیه، ساخت افشانه‌ها و به عنوان گاز خنک‌کننده در وسایل سرمازا همچون یخچال و فریزر استفاده می‌شود.	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
گاز طبیعی	گاز طبیعی که گاهی گاز فسیلی یا به سادگی گاز نیز نامیده می‌شود، مخلوطی طبیعی از هیدروکربن‌های گازی است که عمدتاً از متان و مقادیر کمتری از آلکان‌های بالاتر تشکیل شده است. مقادیر کمی از سایر گازها مانند دی‌اکسید کربن، نیتروژن، سولفید هیدروژن و هلیوم نیز معمولاً در آن وجود دارد	بشکه نفت خام	مرکز آمار ایران
تحقیق و توسعه	هزینه‌های تحقیق و توسعه کارگاه‌های دارای فعالیت تحقیق و توسعه. تحقیق و توسعه به کار خلاقانه‌ای گفته می‌شود که به‌طور سیستماتیک انجام می‌شود تا به دانش موجود بیفزاید و این دانش را برای ابداع کاربردهای تازه به کار برد.	میلیون ریال	مرکز آمار ایران
ساختار صنعت	نسبت ارزش افزوده بخش صنعت از تولید ناخالص داخلی	-	مرکز آمار ایران

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۳) گزارشی از توصیف آماری متغیرهای الگو آرایه می‌دهد.

جدول (۳): خلاصه آماری داده‌ها

متغیر	بیشترین	کمترین	میانگین	انحراف معیار	مشاهده
تولید	۱۶۹۴۸۱۶۸۳۲	۴۸۸۶۰۸	۱۳۶۰۸۱۶۸۳/۳	۲۳۸۰۳۶۶۴۰/۹	۳۹۰

۳۹۰	۵۱۴۸۱۸۸	۳۷۷۳۰۸۲	-۱۴۱۵۴۳۴۷	۲۵۶۸۰۰۹۹	سرمایه
۳۹۰	۷۴۹۹۲/۷۱	۵۰۷۵۳/۵۴	۱۵۴۹	۴۳۲۱۱۶	نیروی کار
۳۹۰	۱۱۳۵۷۵۹۴	۷۷۴۲۹۷۹	۷۲۰۰۰	۶۳۲۸۶۴۲۰	مصرف انرژی
۳۹۰	۱۳۳۵۴/۴۸	۶۸۸۷/۵۳۵۸۹۷	۲۷	۱۳۹۸۱۶	نفت سفید
۳۹۰	۴۲۲۳۸/۰۰۴۵۸	۲۶۷۷۹/۳۶۴۱	۳۹۴	۳۸۲۶۵۷	بنزین
۳۹۰	۹۵۳۴۲/۰۸	۶۲۳۱۹۱/۲۱۲۸	۶۵۰	۸۳۲۶۰۸۵	نفت کوره
۳۹۰	۷۰۰۱۹/۳۶	۲۷۵۹۳/۷۳۰۷۷	۱۱۲	۷۲۳۴۹۷	گاز مایع
۳۹۰	۲۱۲۸۷۲۳۷	۶۵۳۳۱۴۴	۱۳۳۶	۳۸۶۸۵۱۵۹۰	گاز طبیعی
۳۹۰	۳۰۴۴۰۵/۵۴۵۸	۲۴۰۰۲/۲۱۵۴	۶۳۹۹	۲۴۲۶۵۷۰	نفت گاز
۱۵۰	۷۰۶۵۰۶۴/۶۳۷	۱۴۷۶۵۵۷/۸۴۷	۱۴۹۷۰	۸۴۳۱۹۲۶۸	تحقیق و توسعه
۲۴۰	۰/۰۸۷۴	۰/۱۵۴۵	۰/۰۲۳۷	۰/۳۹۵۸	سهم ارزش افزوده بخش صنعت از تولید ناخالص داخلی

منبع: یافته‌های تحقیق

۴- یافته‌های تحقیق

در ادامه، ابتدا انتشار دی‌اکسید کربن استان‌های ایران به عنوان تولید نامطلوب مطابق با IPCC محاسبه می‌شود. چرا که در محاسبه کارایی کربن و کارایی انرژی اکولوژیکی به داده انتشار دی‌اکسید کربن به عنوان تولید نامطلوب احتیاج است. سپس، با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها کارایی انرژی اکولوژیکی کل عوامل و کارایی کربن کل عوامل محاسبه می‌شود. در پایان، با استفاده از مدل (۲۲) به بررسی عوامل مؤثر بر آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱- محاسبه انتشار دی‌اکسید کربن

انتشار دی‌اکسید کربن برای هر حامل انرژی بر اساس ضرایب انتشار مربوط به آن حامل محاسبه شده است. مطابق با IPCC^۱، انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و فرآیندهای صنعتی بیشترین سهم را در انتشار گاز گلخانه‌ای تشکیل می‌دهد. رابطه (۲۳) محاسبه انتشار دی‌اکسید کربن را نشان می‌دهد.

(۲۳) میزان انتشار آلاینده = سطح فعالیت × ضریب انتشار

(Emission = Activity Data × Emission Factor)

Emission میزان انتشار گاز گلخانه‌ای بر حسب واحد جرمی (به طور مثال تن)، Activity Data سطح فعالیت فرایند یا شاخه ایجاد کننده انتشار (بر حسب به طور مثال لیتر و یا ژول) و Emission Factor ضریب انتشار و بر حسب تن بر لیتر و یا گرم بر ژول است. در محاسبه انتشار دی‌اکسید کربن، واحد حامل انرژی با توجه به واحد ضریب انتشار انتخاب و به تناسب آن واحد انرژی تبدیل می‌شود. مطابق با جدول ۴ ضرایب انتشار ارایه شده است که ضرایب بر حسب کیلو تن بر پتا ژول است. در پایان، متغیر انتشار دی‌اکسید کربن کل حامل‌ها بر جمعیت تقسیم شده است که به صورت سرانه در مدل استفاده شود.

^۱ Intergovernmental Panel on Climate Change

جدول (۴): ضرایب انتشار دی اکسید کربن حامل‌های انرژی

حامل‌ها	ضریب انتشار (Kton CO ₂ /PJ)
نفت سفید	۷۱/۱۴۸
بنزین	۶۸/۶۰۷
نفت کوره	۷۶/۵۹۳
نفت گاز	۷۳/۳۲۶
گاز طبیعی	۵۵/۸۲۰
گاز مایع	۶۲/۴۳۶

منبع: یافته‌های تحقیق

۴-۲- اندازه‌گیری کارایی انرژی اکولوژیکی کل عوامل

مقدار کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی استان‌های ایران با سه ورودی و دو خروجی برای دوره زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷ مطابق با رابطه (۲۴) محاسبه و در جدول (۵) گزارش می‌شود.

$$ETFEE(i, t) = \frac{Target\ energy\ input(i, t)}{Actual\ energy\ input(i, t)} \quad (24)$$

جدول (۵): کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی (ETFEE) استان‌های ایران

میانگین	۱۳۹۷	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۲	۱۳۹۱	۱۳۹۰	۱۳۸۹	۱۳۸۸	۱۳۸۷	۱۳۸۶	۱۳۸۵	
آذربایجان شرقی	۰/۴۸۷	۰/۷۷۸	۰/۵۳۹	۰/۴۲۱	۰/۴۶۵	۰/۴۷۶	۰/۵۶۰	۰/۴۳۹	۰/۴۵۶	۰/۳۶۵	۰/۴۰۱	۰/۴۸۶	۰/۴۸۵	۰/۴۶۴
آذربایجان غربی	۰/۴۸۱	۰/۵۰۵	۰/۴۴۹	۰/۳۹۹	۰/۳۷۵	۰/۵۹۷	۰/۴۳۶	۰/۴۹۵	۰/۵۲۵	۰/۳۸۲	۰/۵۱۰	۰/۵۳۲	۰/۵۳۹	۰/۵۰۶
اردبیل	۰/۴۵۳	۰/۴۳۲	۰/۴۳۴	۰/۵۰۴	۰/۴۲۴	۰/۵۲۲	۰/۵۰۹	۰/۴۸۸	۰/۴۴۴	۰/۴۵۴	۰/۴۹۸	۰/۲۰۱	۰/۴۸۲	۰/۵۰۵
اصفهان	۰/۵۶۳	۱/۰۰۰	۰/۴۴۴	۰/۵۴۵	۰/۳۹۹	۰/۴۲۰	۰/۶۱۵	۰/۵۸۵	۰/۶۰۷	۰/۵۲۳	۰/۵۴۱	۰/۵۳۴	۰/۴۹۹	۰/۶۰۲
ایلام	۰/۱۴۷	۰/۱۹۴	۰/۴۹۳	۰/۱۵۷	۰/۴۸۴	۰/۱۰۵۷	۰/۱۴۳	۰/۱۰۵۵	۰/۱۰۴۵	۰/۱۶۶	۰/۱۰۴۲	۰/۱۰۳۲	۰/۱۰۲۶	۰/۱۰۱۸
بوشهر	۰/۴۲۷	۰/۴۱۱	۰/۳۶۷	۰/۲۱۲	۱/۰۰۰	۰/۵۴۱	۰/۷۶۶	۰/۶۰۹	۰/۵۴۶	۰/۱۴۸	۰/۲۱۴	۰/۱۵۲	۰/۱۰۶۳	۰/۵۲۴
تهران و البرز	۰/۵۸۱	۱/۰۰۰	۰/۹۳۶	۰/۸۰۷	۰/۶۲۲	۰/۶۷۹	۰/۵۸۶	۰/۴۴۷	۰/۴۴۴	۰/۵۸۰	۰/۴۳۰	۰/۳۹۰	۰/۳۳۴	۰/۳۰۱
چهارمحال و بختیاری	۰/۳۷۶	۰/۴۸۴	۰/۴۹۸	۰/۴۱۷	۰/۳۵۴	۰/۵۰۲	۰/۲۷۷	۰/۴۸۲	۰/۲۴۶	۰/۲۴۷	۰/۳۰۷	۰/۲۷۳	۰/۳۰۹	۰/۴۸۹
خراسان جنوبی	۰/۳۶۸	۰/۴۸۱	۰/۱۰۷۱	۰/۲۲۰	۰/۲۲۵	۰/۳۰۱	۰/۴۰۴	۰/۱۷۶	۰/۴۸۱	۰/۵۳۲	۰/۴۲۲	۰/۵۲۴	۰/۴۵۲	۰/۴۹۴
خراسان رضوی	۰/۴۲۶	۰/۴۰۸	۰/۵۰۵	۰/۳۷۷	۰/۳۲۴	۰/۳۷۹	۰/۴۱۲	۰/۳۷۶	۰/۵۸۳	۰/۴۱۱	۰/۴۰۶	۰/۴۲۸	۰/۴۳۹	۰/۴۹۴
خراسان شمالی	۰/۱۰۸۲	۰/۴۲۸	۰/۱۰۹۱	۰/۱۰۷۶	۰/۱۰۷۶	۰/۱۰۸۲	۰/۱۰۸۵	۰/۱۰۴۲	۰/۱۰۳۶	۰/۱۰۲۶	۰/۱۰۷۰	۰/۱۰۲۱	۰/۱۰۲۰	۰/۱۰۱۷
خوزستان	۰/۳۳۳	۰/۴۲۸	۰/۲۵۴	۰/۲۹۱	۰/۲۶۸	۰/۷۶۶	۰/۴۷۲	۰/۲۱۰	۰/۲۳۲	۰/۳۴۱	۰/۳۱۸	۰/۱۸۲	۰/۱۵۵	۰/۴۰۷
زنجان	۰/۳۲۰	۰/۳۲۶	۰/۳۲۱	۰/۳۰۰	۰/۲۶۱	۰/۲۹۹	۰/۱۸۴	۰/۳۲۰	۰/۳۶۶	۰/۴۰۴	۰/۳۷۳	۰/۳۷۷	۰/۲۸۴	۰/۳۴۶
سمنان	۰/۴۶۵	۰/۳۱۸	۰/۵۱۷	۰/۵۴۰	۰/۳۲۴	۰/۴۳۱	۰/۴۲۸	۰/۳۹۶	۰/۵۱۲	۰/۵۱۳	۰/۴۸۲	۰/۵۶۹	۰/۵۲۸	۰/۴۸۳
سیستان و بلوچستان	۰/۵۰۱	۰/۴۵۱	۰/۳۸۷	۰/۴۹۴	۰/۳۴۱	۰/۴۹۹	۰/۶۷۶	۰/۵۵۹	۰/۴۳۵	۰/۵۱۵	۰/۵۳۵	۰/۵۳۰	۰/۵۵۵	۰/۵۳۷
فارس	۰/۴۶۰	۰/۳۷۶	۰/۴۷۷	۰/۴۵۸	۰/۴۳۹	۰/۴۴۳	۰/۴۵۰	۰/۴۷۴	۰/۵۱۱	۰/۴۳۵	۰/۴۱۷	۰/۴۵۳	۰/۵۱۸	۰/۵۲۵
قزوین	۰/۴۰۴	۰/۴۴۷	۰/۴۳۹	۰/۵۲۴	۰/۴۲۸	۰/۴۳۷	۰/۳۲۷	۰/۳۶۶	۰/۳۶۵	۰/۳۵۸	۰/۳۲۶	۰/۳۷۰	۰/۳۹۹	۰/۴۶۵
قم	۰/۴۶۶	۰/۶۱۱	۰/۴۹۰	۰/۴۱۵	۰/۴۰۱	۰/۵۰۳	۰/۴۹۴	۰/۴۸۳	۰/۴۰۴	۰/۶۴۱	۰/۴۶۴	۰/۳۳۴	۰/۴۸۹	۰/۳۳۰
کردستان	۰/۴۶۱	۰/۶۷۵	۰/۳۷۷	۰/۴۱۷	۰/۲۸۰	۰/۵۶۹	۰/۶۷۵	۰/۳۵۹	۰/۲۹۵	۰/۴۸۵	۰/۵۳۱	۰/۴۳۸	۰/۴۶۴	۰/۴۲۳

کرمان	۰/۴۵۰	۰/۳۵۹	۰/۴۰۹	۰/۳۴۹	۰/۳۶۳	۰/۳۶۳	۰/۳۶۳	۰/۵۲۰	۰/۷۱۳	۰/۴۷۹	۰/۴۱۷	۰/۴۲۰	۰/۴۳۹	۰/۷۲۵	۰/۴۶۲
کرمانشاه	۰/۴۷۹	۰/۵۴۸	۰/۵۴۱	۰/۵۷۳	۰/۵۱۶	۰/۶۲۸	۰/۴۳۷	۰/۲۰۲	۰/۵۵۵	۰/۵۰۱	۰/۵۸۲	۰/۴۶۵	۰/۵۰۳	۰/۵۰۲	۰/۵۰۲
کهگیلویه و بویراحمد	۰/۳۰۵	۰/۶۸۸	۰/۷۲۰	۰/۵۱۲	۰/۴۵۰	۰/۴۶۹	۰/۳۴۹	۰/۶۹۳	۰/۱۸۱	۰/۳۸۳	۰/۲۲۸	۰/۱۶۴	۰/۳۸۱	۰/۴۲۵	۰/۴۲۵
گلستان	۰/۰۸۱	۰/۲۴۲	۰/۵۳۵	۰/۵۰۴	۰/۵۳۳	۰/۱۲۴	۰/۱۳۵	۰/۲۳۳	۰/۶۵۷	۰/۷۲۰	۰/۷۳۴	۰/۵۹۳	۰/۴۱۲	۰/۴۲۳	۰/۴۲۳
گیلان	۰/۷۱۸	۰/۴۱۸	۰/۴۱۲	۰/۳۶۵	۰/۴۴۸	۰/۳۱۱	۰/۵۶۷	۰/۴۰۸	۰/۳۵۰	۰/۳۷۰	۰/۴۵۳	۰/۴۰۸	۰/۵۵۶	۰/۴۴۵	۰/۴۴۵
لرستان	۰/۴۵۶	۰/۶۷۵	۰/۴۵۲	۰/۳۸۷	۰/۴۰۴	۰/۴۱۰	۰/۳۸۶	۰/۴۳۰	۰/۴۴۶	۰/۲۸۸	۰/۳۹۳	۰/۵۰۹	۰/۴۶۲	۰/۴۳۸	۰/۴۳۸
مازندران	۰/۴۳۴	۰/۲۹۵	۰/۴۰۱	۰/۴۵۲	۰/۴۷۳	۰/۳۶۶	۰/۳۷۱	۰/۵۱۵	۰/۳۴۵	۰/۴۷۶	۰/۳۹۶	۰/۴۱۶	۰/۴۵۵	۰/۴۱۵	۰/۴۱۵
مرکزی	۰/۵۱۰	۰/۴۱۶	۰/۳۴۸	۰/۳۹۲	۰/۴۴۲	۰/۵۹۱	۰/۴۱۶	۰/۶۱۷	۰/۶۱۱	۰/۵۸۶	۰/۴۱۷	۰/۴۹۴	۱/۰۰۰	۰/۵۲۶	۰/۵۲۶
هرمزگان	۰/۰۳۸	۰/۴۶۴	۰/۴۴۳	۰/۶۲۶	۰/۵۴۳	۰/۶۴۶	۰/۴۱۹	۰/۶۴۷	۰/۵۸۵	۰/۲۲۷	۰/۳۳۳	۰/۳۹۲	۱/۰۰۰	۰/۴۸۹	۰/۴۸۹
همدان	۰/۴۹۷	۰/۵۴۲	۰/۴۷۱	۰/۵۰۴	۰/۴۰۳	۰/۴۶۷	۰/۴۳۲	۰/۴۹۶	۰/۴۰۲	۰/۲۷۹	۰/۳۷۱	۰/۴۱۶	۰/۴۱۶	۰/۴۳۸	۰/۴۳۸
یزد	۰/۴۳۸	۰/۴۴۴	۰/۴۱۷	۰/۴۸۳	۰/۴۴۹	۰/۳۹۶	۰/۲۸۷	۰/۳۶۰	۰/۴۸۲	۰/۴۷۶	۰/۴۸۵	۰/۴۴۶	۰/۵۱۳	۰/۴۳۷	۰/۴۳۷

منبع: یافته‌های تحقیق

توصیف آماری متغیر کارایی در جدول (۶) گزارش می‌شود.

جدول (۶): توصیف آماری کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی (ETFEE) استان‌های ایران

میانگین	انحراف معیار	مینیمم	ماکزیمم
۰/۴۲۶۷	۰/۱۶۴۸	۰/۰۱۷	۱

منبع: یافته‌های تحقیق

متوسط کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی استان‌های ایران ۴۲/۶۷٪ است. بیشترین کارایی مربوط به استان تهران (۵۸/۱٪) و کمترین مربوط به استان خراسان شمالی (۸/۲٪) است. متوسط کارایی استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، اصفهان، تهران و البرز، سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، قم، کردستان، کرمان، کرمانشاه، گیلان، لرستان، مرکزی، هرمزگان، همدان، یزد بالاتر از متوسط استان‌ها و استان‌های بوشهر، خراسان رضوی، گلستان، کهگیلویه و بویر احمد نزدیک به متوسط و بقیه استان‌ها کمتر از متوسط هستند.

استان‌های ایران را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد. این تقسیم بندی بر اساس سهم تولید ناخالص داخلی استانی در سال ۱۳۹۹ بر پایه مرکز آمار ایران انجام شده است. گروه ۱ بیشترین و گروه ۳ کمترین سهم را دارند. استان‌های تهران، اصفهان، خراسان رضوی، بوشهر و خوزستان گروه ۱، استان‌های کردستان، خراسان شمالی، خراسان جنوبی، سمنان و چهارمحال و بختیاری استان‌های گروه ۳ هستند. بقیه استان‌ها به گروه ۲ تعلق دارند. استان خوزستان استانی است که با وجود آنکه در گروه ۱ قرار دارد کارایی انرژی پایینی دارد. همچنین، استان سمنان و کردستان با وجود آنکه در گروه ۳ قرار دارند کارایی بالایی دارند. استان‌های ایلام، زنجان، قزوین و مازندران از استان‌های گروه دوم هستند که کارایی انرژی پایین تر از متوسط دارند. بقیه استان‌های این گروه (آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، سیستان و بلوچستان، فارس، قم، کرمان، کرمانشاه، کهگیلویه و بویر احمد، گلستان، گیلان، لرستان، مازندران، مرکزی، هرمزگان، همدان و یزد) کارایی انرژی متوسط به بالا دارند.

۴-۳- اندازه‌گیری کارایی کربن کل عوامل

مقدار کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران با سه ورودی و دو خروجی برای دوره زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۷ مطابق با رابطه (۲۵) محاسبه و در جدول (۷) گزارش می‌شود.

$$TFCEE = \frac{(C - \beta_C^* C) / (Y + \beta_Y^* Y)}{C/Y} = \frac{1 - \beta_C^*}{1 + \beta_Y^*} \quad (25)$$

جدول (۷): کارایی کربن کل عوامل (TFCEE) استان‌های ایران

میانگین	۱۳۹۷	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۴	۱۳۹۳	۱۳۹۲	۱۳۹۱	۱۳۹۰	۱۳۸۹	۱۳۸۸	۱۳۸۷	۱۳۸۶	۱۳۸۵	
آذربایجان شرقی	۰/۲۸۰	۰/۵۲۰	۰/۹۸۸	۰/۲۰۳	۰/۲۸۹	۰/۲۹۹	۰/۲۲۰	۰/۲۸۳	۰/۲۰۷	۰/۱۸۱	۰/۱۷۰	۰/۰۹۷	۰/۰۸۹	
آذربایجان غربی	۰/۱۱۹	۰/۳۰۳	۰/۲۴۱	۰/۱۷۵	۰/۱۴۰	۰/۰۹۴	۰/۱۰۹	۰/۰۹۸	۰/۰۷۸	۰/۰۶۷	۰/۰۸۰	۰/۰۶۶	۰/۰۴۹	
اردبیل	۰/۲۸۴	۰/۲۸۹	۰/۹۸۵	۰/۲۷۵	۰/۲۱۱	۰/۲۳۲	۰/۲۰۶	۰/۱۳۷	۰/۱۱۱	۰/۰۸۶	۰/۰۷۹	۰/۰۷۲	۰/۹۵۴	
اصفهان	۰/۲۴۶	۱/۰۰۰	۰/۴۹۰	۰/۲۲۳	۰/۲۳۴	۰/۲۶۴	۰/۲۷۱	۰/۱۶۹	۰/۱۷۲	۰/۰۸۶	۰/۱۰۸	۰/۰۶۶	۰/۰۴۶	
ایلام	۰/۰۶۸	۰/۱۶۸	۰/۱۳۹	۰/۱۵۶	۰/۱۱۲	۰/۰۵۸	۰/۰۵۶	۰/۰۵۷	۰/۰۴۸	۰/۰۲۰	۰/۰۲۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	
بوشهر	۰/۳۴۷	۰/۴۳۵	۰/۲۹۹	۰/۲۱۹	۱/۰۰۰	۰/۴۱۰	۰/۴۶۵	۰/۶۲۳	۰/۳۹۱	۰/۱۶۹	۰/۱۱۰	۰/۱۵۱	۰/۱۴۱	
تهران و البرز	۰/۷۷۸	۱/۰۰۰	۰/۹۵۸	۰/۹۸۲	۰/۸۷۹	۰/۹۵۷	۰/۹۶۰	۰/۹۸۹	۰/۹۵۹	۰/۹۴۱	۰/۲۳۵	۰/۸۹۵	۰/۱۳۹	
چهارمحال و بختیاری	۰/۱۹۱	۰/۴۶۰	۰/۳۲۹	۰/۲۶۹	۰/۲۵۴	۰/۲۸۷	۰/۱۹۱	۰/۱۵۹	۰/۰۹۹	۰/۰۹۸	۰/۰۶۵	۰/۰۶۰	۰/۱۰۲	
خراسان جنوبی	۰/۱۲۵	۰/۲۲۰	۰/۴۱۲	۰/۱۳۶	۰/۱۷۴	۰/۱۵۹	۰/۱۱۴	۰/۰۷۴	۰/۱۱۲	۰/۰۵۸	۰/۰۴۹	۰/۰۴۲	۰/۰۳۷	
خراسان رضوی	۰/۳۲۷	۰/۳۲۳	۰/۳۰۰	۰/۲۳۸	۰/۲۶۷	۰/۱۹۲	۰/۱۸۶	۰/۹۷۷	۰/۲۷۵	۰/۱۲۴	۰/۱۵۰	۰/۱۴۵	۱/۰۰۰	
خراسان شمالی	۰/۰۵۴	۰/۱۰۷	۰/۰۸۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۹	۰/۰۸۴	۰/۰۸۸	۰/۰۴۳	۰/۰۳۶	۰/۰۲۶	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰	
خوزستان	۰/۲۳۰	۰/۸۵۷	۰/۲۴۱	۰/۱۷۷	۰/۲۱۳	۰/۲۶۴	۰/۲۸۹	۰/۱۶۲	۰/۱۵۰	۰/۱۵۰	۰/۱۰۹	۰/۲۶۸	۰/۰۶۲	
زنجان	۰/۴۰۰	۰/۶۰۴	۰/۹۸۷	۰/۹۹۰	۰/۹۷۲	۰/۲۷۴	۰/۲۶۴	۰/۳۴۵	۰/۱۵۷	۰/۱۲۸	۰/۱۵۳	۰/۱۴۱	۰/۱۱۶	
سمنان	۰/۳۲۹	۰/۴۰۷	۰/۹۶۲	۰/۳۲۳	۰/۲۶۸	۰/۲۷۴	۰/۳۱۴	۰/۳۴۸	۰/۹۲۸	۰/۱۵۰	۰/۱۲۴	۰/۰۸۳	۰/۰۹۰	
سیستان و بلوچستان	۰/۱۰۲	۰/۱۸۷	۰/۱۲۱	۰/۱۷۳	۰/۱۷۸	۰/۱۳۱	۰/۱۷۸	۰/۰۸۸	۰/۰۸۳	۰/۰۳۴	۰/۰۵۰	۰/۰۳۹	۰/۰۲۶	
فارس	۰/۱۶۸	۰/۲۶۴	۰/۲۰۷	۰/۲۱۱	۰/۱۸۹	۰/۲۲۷	۰/۲۳۴	۰/۱۸۱	۰/۱۲۵	۰/۱۸۷	۰/۱۱۰	۰/۰۹۳	۰/۰۸۲	
فروین	۰/۳۰۳	۰/۵۴۸	۰/۳۷۸	۰/۳۵۲	۰/۲۸۷	۰/۲۶۴	۰/۲۳۴	۰/۲۲۵	۰/۱۸۱	۰/۹۲۰	۰/۱۱۹	۰/۱۵۲	۰/۱۵۵	
قم	۰/۲۲۳	۰/۵۱۲	۰/۲۸۳	۰/۲۳۱	۰/۳۴۸	۰/۱۹۹	۰/۲۰۰	۰/۱۴۶	۰/۱۲۱	۰/۲۳۵	۰/۱۹۹	۰/۲۰۳	۰/۰۷۱	
کردستان	۰/۱۹۱	۰/۲۵۳	۰/۲۴۲	۰/۳۰۷	۰/۲۸۰	۰/۲۹۸	۰/۳۲۱	۰/۲۳۸	۰/۰۸۴	۰/۱۲۳	۰/۰۷۸	۰/۱۰۷	۰/۰۶۶	
کرمان	۰/۳۱۶	۰/۷۱۸	۰/۳۲۹	۰/۲۵۳	۰/۹۸۹	۰/۳۱۸	۰/۳۹۱	۰/۳۱۵	۰/۱۷۶	۰/۱۳۵	۰/۱۶۸	۰/۰۹۷	۰/۱۲۴	
کرمانشاه	۰/۲۰۷	۰/۴۱۲	۰/۲۵۵	۰/۹۲۴	۰/۱۷۸	۰/۱۷۷	۰/۱۹۵	۰/۰۸۴	۰/۱۴۶	۰/۰۷۷	۰/۰۹۰	۰/۰۴۷	۰/۰۶۲	
کهگیلویه و بویراحمد	۰/۲۰۰	۰/۲۸۰	۰/۱۵۲	۰/۱۳۰	۰/۲۵۰	۰/۷۴۷	۰/۲۹۰	۰/۱۹۴	۰/۱۵۳	۰/۱۵۰	۰/۰۶۷	۰/۰۵۱	۰/۱۰۷	
گلستان	۰/۲۱۹	۰/۶۴۳	۰/۴۳۷	۰/۳۱۳	۰/۳۰۶	۰/۲۳۵	۰/۲۲۳	۰/۱۰۷	۰/۱۲۵	۰/۱۱۲	۰/۰۹۰	۰/۰۹۹	۰/۰۸۹	
گیلان	۰/۲۹۶	۰/۵۸۵	۰/۹۸۸	۰/۲۱۹	۰/۲۳۹	۰/۲۷۹	۰/۳۱۴	۰/۳۱۱	۰/۱۷۲	۰/۱۵۵	۰/۲۳۵	۰/۱۴۶	۰/۱۱۱	
لرستان	۰/۲۲۴	۰/۹۵۶	۰/۳۵۰	۰/۳۱۷	۰/۲۱۴	۰/۱۹۸	۰/۲۰۴	۰/۱۸۳	۰/۰۹۹	۰/۱۰۶	۰/۰۸۰	۰/۰۷۰	۰/۰۶۹	
مازندران	۰/۳۴۰	۰/۴۲۴	۰/۹۹۰	۰/۲۸۲	۰/۲۱۵	۰/۹۹۲	۰/۲۸۲	۰/۲۷۳	۰/۱۵۴	۰/۱۸۹	۰/۱۷۰	۰/۱۴۸	۰/۱۸۳	
مرکزی	۰/۲۸۵	۱/۰۰۰	۰/۳۲۱	۰/۲۸۴	۰/۲۲۳	۰/۲۷۰	۰/۳۳۳	۰/۳۲۹	۰/۳۴۸	۰/۱۸۲	۰/۱۶۰	۰/۱۰۹	۰/۰۸۱	

هرمزگان	۰/۰۳۸	۰/۰۵۵	۰/۰۷۵	۰/۳۷۳	۰/۳۱۴	۰/۳۹۳	۰/۴۵۵	۰/۷۰۰	۰/۴۵۰	۰/۲۰۹	۰/۳۳۴	۰/۳۸۴	۱/۰۰۰	۰/۳۶۰
همدان	۰/۰۶۰	۰/۰۷۸	۰/۰۷۱	۰/۰۷۵	۰/۰۸۰	۰/۰۹۵	۰/۰۸۲	۰/۱۳۱	۰/۱۲۱	۰/۱۳۳	۰/۱۶۲	۰/۲۵۴	۰/۲۷۷	۰/۱۲۵
یزد	۰/۰۷۰	۰/۰۷۹	۰/۱۱۰	۰/۱۱۰	۰/۱۴۳	۰/۱۴۱	۰/۱۳۶	۰/۱۹۸	۰/۱۹۰	۰/۱۶۹	۰/۱۵۴	۰/۱۵۰	۰/۴۴۱	۰/۱۶۱

منبع: یافته‌های تحقیق

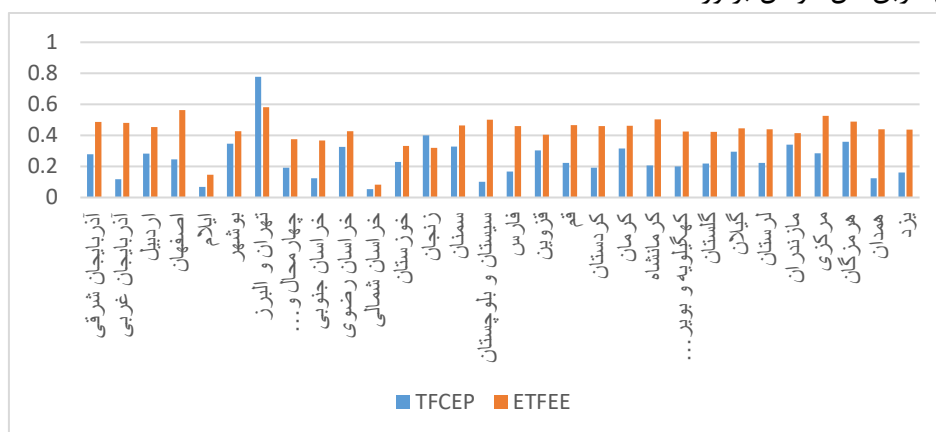
توصیف آماری متغیر کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران در جدول (۸) گزارش می‌شود.

جدول (۸): توصیف آماری کارایی کربن کل عوامل (TFCEE) استان‌های ایران

میانگین	انحراف معیار	مینیمم	ماکزیمم
۰/۲۴۹۸	۰/۲۴۶۲	۰/۰۱۰۲	۱

منبع: یافته‌های تحقیق

متوسط کارایی کربن کل عوامل استان‌های ایران ۲۹/۴۸٪ است. بیشترین کارایی کربن مربوط به استان تهران (۷۷/۸٪) و کمترین مربوط به استان خراسان شمالی (۵/۴٪) است. استان‌های آذربایجان شرقی، اردبیل، بوشهر، تهران و البرز، خراسان رضوی، زنجان، سمنان، قزوین و کرمان بالاتر از متوسط و اصفهان نزدیک به متوسط هستند. استان خوزستان استانی است که با وجود آنکه در گروه ۱ قرار دارد کارایی کربن پایینی دارد. به جز خوزستان، بقیه استان‌های گروه ۱ کارایی کربن متوسط به بالا دارند. همچنین، استان سمنان استانی است که با وجود آنکه در گروه ۳ قرار دارد کارایی کربن بالایی دارد. به جز سمنان، بقیه استان‌های گروه ۳ کارایی کربن متوسط به پایین دارند. استان‌های آذربایجان غربی، ایلام، سیستان و بلوچستان، فارس، قم، کرمانشاه، کهگیلویه و بویر احمد، گلستان، لرستان، همدان و یزد از استان‌های گروه دوم هستند که کارایی کربن پایین‌تر از متوسط دارند. بقیه استان‌های این گروه (آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان، قزوین، کرمان، گلستان، گیلان، مازندران، مرکزی و هرمزگان) کارایی کربن متوسط به بالا دارند. مطابق با نمودار (۱) به جز استان تهران و البرز، در بقیه استان‌ها شاخص کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی بزرگتر از شاخص کارایی کربن کل عوامل برآورد شده است.



نمودار (۱): مقایسه کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و شاخص کارایی کربن کل عوامل

منبع: یافته‌های تحقیق

نتایج این مطالعه با آذر (۱۴۰۳) قابل مقایسه است. در این مطالعه بیشترین میزان متوسط کارایی انرژی مربوط به استان‌های هرمزگان، تهران، بوشهر، آذربایجان و کرمان و کمترین آن نیز مربوط به خراسان شمالی، خراسان جنوبی، چهارمحال بختیاری، سیستان و بلوچستان و لرستان می‌باشد.

۴-۴- بررسی عوامل مؤثر بر کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل

پس از محاسبه کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی استان‌های ایران در ادامه به بررسی تأثیر شدت انرژی، مخارج تحقیق و توسعه و ساختار صنعت بر آنها پرداخته می‌شود.

۴-۴-۱- بررسی ارتباط بلندمدت متغیرهای مدل

به منظور بررسی وجود ارتباط بلندمدت میان متغیرهای الگو ابتدا بایستی وابستگی مقطعی و سپس پایایی متغیرهای الگو بررسی گردد. با وجود داده‌های پانل لازم است قبل از انجام آزمون ریشه واحد ابتدا وابستگی مقطعی در داده‌ها بررسی شود. اگر وابستگی مقطعی در داده‌ها تایید شود، می‌بایست از آزمون‌های ریشه واحد و هم‌انباشتگی‌ای که این وابستگی را لحاظ می‌کنند استفاده کرد. در غیر اینصورت، می‌توان از آزمون‌های ریشه واحد و هم‌انباشتگی معمولی استفاده کرد. در این مطالعه، از سه آزمون وابستگی مقطعی، پسران، فریدمن و فری^۱ استفاده و نتایج این آزمون‌ها در جدول (۹) گزارش شده است.

جدول (۹): آزمون وابستگی مقطعی

نتیجه	TFCEE		ETFEE		آزمون
	مقدار احتمال	آماره	مقدار احتمال	آماره	
استقلال مقطعی	۰/۵۵۱۶	۰/۵۹۵	۰/۶۴۰۷	۰/۴۶۷	پسران
استقلال مقطعی	۱/۰۰۰	۷/۵۲۰	۱/۰۰۰	۳/۶۸۰	فریدمن
نتیجه	TFCEE	ETFEE	مقادیر بحرانی		آزمون
	آماره	آماره			
استقلال مقطعی بر اساس $ETFEE_{it}$ و وابستگی مقطعی بر اساس $TFCEE_{it}$	Frees' test of cross sectional independence		۱٪	۵٪	فری
	۱/۱۴۲	-۰/۱۲۷	۱/۴۲۱۱	۰/۸۳۹۱	
				۰/۵۸۲۲	

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با مقدار احتمال، فرضیه صفر دال بر استقلال مقطعی پذیرفته می‌شود. بنابراین می‌توان از آزمون‌های سنتی ریشه واحد برای بررسی پایایی متغیرهای مدل استفاده نمود. از دو گروه آزمون‌های ریشه واحد استفاده می‌شود؛ با در نظر گرفتن شکست ساختاری و بدون در نظر گرفتن شکست ساختاری. نتایج این آزمون‌ها در جدول (۱۰) گزارش شده است.

^۱ Friedman

جدول (۱۰). آزمون ریشه واحد: بررسی پایایی متغیرهای مدل

متغیر	آزمون ریشه واحد بدون شکست ساختاری										
	آزمون ریشه واحد LLC			آزمون ریشه واحد IPS							
	آماره	۱٪	۵٪	نتیجه	آماره	احتمال	نتیجه	آماره	احتمال	نتیجه	
ETFEE _{it}	-۲/۴۷۵۵ -۱/۸۷۷۲	-۱/۸۳۰	-۱/۷۴۰	-۱/۶۹۰	I (0)	-۱۱/۰۴۰۰ -۳/۵۵۳۱	۰/۰۰۰۲	I (0)	-۰/۵۴۶۷	۰/۰۰۰	I (0)
TFCEE _{it}	-۰/۹۱۹۱ -۰/۷۳۵۲	-۱/۸۳۰	-۱/۷۴۰	-۱/۶۹۰	I (1)	-۱/۴۴۳۷ ۴/۵۷۸۵	۱/۰۰۰۰	I (1)	-۱/۶۶۶۳	۰/۰۰۰	I (0)
ΔTFCEE _{it}	-۳/۸۲۲۱ -۲/۱۶۱۴	-۱/۸۳۰	-۱/۷۴۰	-۱/۶۹۰		-۱۴/۷۳۱۷ -۱/۹۱۳۰	۰/۰۲۷۹				
log R D _{it}	-۰/۲۸۸۹ -۰/۳۲۸۵	-۲/۲۰۰	-۱/۹۵۰	-۱/۸۵۰	I (1)				-۰/۸۰۱۳	۰/۰۰۰	I (0)
Δ log R D _{it}	-۳/۲۷۳۱ -۱/۱۸۹۳	-۲/۲۰۰	-۱/۹۵۰	-۱/۸۵۰							
log E I _{it}	-۰/۵۴۴۸ -۰/۵۱۷۹	-۱/۸۳۰	-۱/۷۴۰	-۱/۶۹۰	I (1)	-۱/۰۳۸۸ ۱/۷۷۱۹	۰/۹۶۱۸	I (1)	-۰/۶۵۹۹	۰/۰۰۰	I (0)
Δ log E I _{it}	-۳/۵۷۷۷ -۲/۲۹۹۹	-۱/۸۳۰	-۱/۷۴۰	-۱/۶۹۰		-۱۵/۳۴۹۲ -۵/۸۷۵۳	۰/۰۰۰				
log A S _{it}	-۲/۲۰۷۸ -۱/۵۸۳۶	-۱/۸۳۰	-۱/۷۴۰	-۱/۶۹۰	I (0)	-۱۵/۴۷ -۱۱/۷۷	۰/۰۰۰	I (0)	-۰/۰۳۴۴	۰/۰۰۰	I (0)

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱۰)، با در نظر گرفتن شکست ساختاری همه متغیرها در سطح پایا هستند. بدون در نظر گرفتن شکست ساختاری برخی متغیرها در سطح و برخی در تفاضل مرتبه اول پایا هستند. با توجه به نتایج آزمون ریشه واحد، می‌بایست آزمون هم‌انباشتگی به منظور بررسی وجود ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل انجام شود. جدول (۱۱) نتایج آزمون هم‌انباشتگی کائو^۱ و پدرونی را گزارش می‌دهد.

جدول (۱۱): آزمون هم‌انباشتگی: بررسی ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل

نتیجه	ETFEE		TFCEE		
	مقدار احتمال	آماره	مقدار احتمال	آماره	
	آزمون هم انباشتگی کائو				
تایید ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل	۰/۰۰۰۰	۵/۲۳۶۷	۰/۰۰۰۰	۴/۴۱۷۶	Modified Dickey-Fuller t
	۰/۰۰۰۰	۵/۱۹۰۹	۰/۰۰۳۷	۲/۶۷۸۴	Dickey-Fuller t
	۰/۰۰۰۱	۳/۷۳۵۵	۰/۳۵۷۱	۰/۳۶۶۲	Augmented Dickey-Fuller t

^۱ Kao

	۰/۰۸۶۹	-۱/۳۶۰۰	۰/۰۴۶۳	-۱/۶۸۱۷	Unadjusted modified Dickey-Fuller t
	آزمون هم‌انباشتگی پدرونی				
	۰/۰۰۰۰	۷/۳۹۵۷	۰/۰۰۰۰	۷/۳۹۵۷	Modified Phillips-Perron t
	۰/۰۰۰۰	-۲۳/۸۲۳۷	۰/۰۰۰۰	-۲۳/۸۲۳۷	Phillips-Perron t
	۰/۰۰۰۰	-۱۵۹/۷۸۸۴	۰/۰۰۰۰	-۱۵۹/۷۸۸۴	Augmented Dickey-Fuller t

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱۱)، ارتباط بلندمدت میان متغیرهای مدل تأیید می‌شود.

۴-۴-۲- برآورد رگرسیون توبیت

نتایج برآورد مدل (۲۲) در جدول (۱۲) گزارش شده است.

جدول (۱۲): برآورد مدل توبیت

ETFEE		TFCEE		متغیرها
مقدار احتمال	ضرایب	مقدار احتمال	ضرایب	
۰/۰۷۰۰	۰/۰۱۱۳	۰/۰۲۵	۰/۰۷۶۸	$\log RD_{it}$
۰/۰۰۰	-۰/۱۸۹۴	۰/۰۰۱	-۰/۳۵۵۸	$\log EI_{it}$
۰/۱۳۰	۰/۰۹۲۸	۰/۸۹۹	-۰/۰۰۹۰	$\log AS_{it}$
۰/۱۷۹	۰/۲۲۲۷	۰/۰۰۰۰	-۰/۵۸۲۴	Constant
آماره‌های تشخیصی				
۷۹/۶۶		۵۴/۳۲		Likelihood Ratio
-۱۴۷/۳۲		-۹۶/۶۴		AIC
۲۲/۶۳ (۰/۰۰۰)		۵۷/۹۸ (۰/۰۰۰)		Wald test
chibar2(01) = 10.64 Prob >= chibar2 = 0.001		chibar2(01) = 7.90 Prob >= chibar2 = 0.002		LR test of sigma_u=0

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱۲) ضرایب متغیرهای $\log RD_{it}$ و $\log EI_{it}$ به ترتیب مثبت و منفی و به لحاظ آماری معنی‌دار هستند. شدت انرژی به دلیل افزایش تقاضا برای مصرف انرژی منجر به کاهش کیفیت محیط‌زیست می‌گردد.

تحقیق و توسعه عامل مهمی است که بر کارایی انرژی اثر می‌گذارد. پیشرفت تکنولوژیکی توابع تولید را تغییر می‌دهد و نیاز به انرژی را به طور مستقیم به عنوان یک عامل تولید و به طور غیرمستقیم کاهش می‌دهد و نیاز به استفاده از کالاهای واسطه‌ای که نیاز به تولید انرژی دارند، کاهش می‌یابد. شومپتر^۱ (۱۹۵۰) منبع اصلی رشد بهره‌وری را ناشی از محصولات و فرایندهای جدید مبتنی بر پیشرفت و فناوری می‌داند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فعالیت‌های

^۱ Schumpeter

مربوط به تحقیق و توسعه، به عنوان پیشران‌های اصلی بهره‌وری و رشد اقتصادی محسوب می‌شود و به طور چشم‌گیری به توسعه اقتصادی و بهبود سطح زندگی جوامع یاری می‌رساند (نجفی و آذربایجانی، ۱۳۹۹). سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش تحقیق و توسعه از طریق افزایش ظرفیت پیشرفت فنی و نوآوری منجر به رشد تولیدات و رشد اقتصادی همگام با کاهش دی‌اکسید کربن می‌شود. وانگ و ژائو (۲۰۲۱) بیان می‌کنند کارایی انرژی سبز کل عوامل رابطه مثبتی با پیشرفت تکنولوژی داشته در حالی که رابطه آن با شدت انرژی به طور قابل توجهی منفی است. لی و ما (۲۰۲۱) و ما و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهند که نوآوری تکنولوژیکی به طور قابل توجهی کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود می‌بخشد. ژو و همکاران (۲۰۲۳) عنوان می‌کنند فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات با کارایی انرژی سبز کل عوامل همبستگی مثبت دارد. ساختار انرژی و شدت سرمایه گذاری تحقیق و توسعه دو عامل مؤثر بر رابطه بین فن‌آوری اطلاعات و ارتباطات و کارایی انرژی سبز کل عوامل است.

سهم ارزش افزوده صنعت از تولید ناخالص داخلی تأثیر معنی داری بر کارایی انرژی ندارد. وو و همکاران (۲۰۲۱) عنوان می‌کنند که اینترنت میتواند به طور غیرمستقیم کارایی انرژی سبز کل عوامل منطقه‌ای را از طریق بهبود توانایی نوآوری منطقه‌ای و ارتقاء ساختار صنعتی بهبود بخشد. لی و ما (۲۰۲۱) بیان می‌کنند که ساختار صنعتی، ساختار انرژی و مقررات زیست محیطی رابطه منفی و معنی داری با کارایی انرژی سبز کل عوامل دارند. ما و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهند که کارایی انرژی سبز کل عوامل به طور قابل توجهی توسط عواملی چون ساختار صنعتی، نوآوری‌های تکنولوژیکی، ساختار انرژی و سرمایه انسانی بهبود می‌یابد. گائو و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهند دیجیتالی شدن میتواند از طریق نوآوری‌های تکنولوژیکی و به روز رسانی ساختار صنعتی، کارایی انرژی سبز کل عوامل را بهبود ببخشد. شائو و وانگ (۲۰۲۳) بیان می‌کنند ساختار صنعتی و نوآوری‌های تکنولوژیکی کانال‌های مهمی برای شاخص نوع جدید شهرنشینی هستند که بتواند کارایی انرژی سبز کل عوامل را تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۴-۴- آزمون علیت گرنجری

نتایج آزمون علیت گرنجری در ادامه در جدول (۱۳) ارائه می‌شود.

جدول (۱۳): نتایج آزمون علیت گرنجری

مقدار احتمال	آماره	
۰/۰۰۰۰	۲۰/۹۷۹۵	شدت انرژی علیت کارایی انرژی است.
۰/۲۲۸۹	۱/۴۵۲۸	کارایی انرژی علیت شدت انرژی است.
۰/۰۰۰۰	۸۴/۹۸۴۴	شدت انرژی علیت کارایی کربن است.
۰/۵۷۰۱	۰/۳۲۲۰	کارایی کربن علیت شدت انرژی است.
۰/۰۶۶۶	۳/۴	سهم ارزش افزوده بخش صنعت علیت کارایی انرژی است.
۰/۰۰۸۷	۷/۰۲۳۳	کارایی انرژی علیت سهم ارزش افزوده بخش صنعت است.
۰/۱۸۵۰	۱/۷۶۹۱	سهم ارزش افزوده بخش صنعت علیت کارایی کربن است.
۰/۰۷۶۳	۳/۱۷۳۹	کارایی کربن علیت سهم ارزش افزوده بخش صنعت است.
۰/۰۵۰۱	۳/۹۱۸۹	نوآوری علیت کارایی انرژی نیست.
۰/۱۶۰۹	۱/۹۹۰۶	کارایی انرژی علیت نوآوری نیست.
۰/۰۱۶۳	۵/۹۴۲۴	نوآوری علیت کارایی کربن است.
۰/۳۸۵۶	۰/۷۵۸۳	کارایی کربن علیت نوآوری است.

منبع: یافته‌های تحقیق

مطابق با جدول (۱۳)، شدت انرژی و نوآوری علیت کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی و کارایی کربن کل عوامل است. ساختار صنعت علیت کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی است ولی علیت کارایی کربن کل عوامل نیست.

۵- نتیجه‌گیری و توصیه سیاستی

هدف این پژوهش تحلیل و بررسی کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی (ETFEE) و کارایی کربن کل عوامل (TFCEE) استان‌های ایران در فاصله زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۷ است. لذا، ابتدا انتشار دی‌اکسید کربن استان‌های ایران به عنوان تولید نامطلوب مطابق با IPCC محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و مدل SBM شاخص ETFEE و با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و تابع فاصله جهت‌دار شاخص TFCEE محاسبه می‌شود. در پایان، با استفاده از مدل توبیت به بررسی تأثیر شدت انرژی، نوآوری و سهم ارزش افزوده صنعت از تولید ناخالص داخلی بر ETFEE و TFCEE پرداخته می‌شود.

متوسط کارایی انرژی کل عوامل اکولوژیکی استان‌های ایران ۴۲/۶۷٪ و متوسط کارایی کربن کل عوامل ۲۴/۹۸٪ است. بر اساس هر دو شاخص، بیشترین کارایی مربوط به استان تهران و کمترین مربوط به استان خراسان شمالی است. در هر دو شاخص، استان خوزستان استانی است که با وجود آنکه سهم بالایی در تولید ناخالص داخلی دارد اما کارایی پایینی دارد. همچنین، استان سمنان استانی است که با وجود آنکه سهم پایینی در تولید ناخالص داخلی دارد اما کارایی بالایی دارد. در هر دو شاخص، استان ایلام استانی است که در گروه دوم (سهم متوسط در تولید) قرار دارد و کارایی متوسط به پایینی دارد. در هر دو شاخص، استان‌های آذربایجان شرقی، اردبیل، کرمان، گلستان، گیلان، مازندران و هرمزگان استان‌های با سهم تولید متوسطی هستند که شاخص کارایی بالاتر از متوسط دارند. لذا، می‌توان استنباط نمود تولید می‌تواند عامل مهمی در کارایی انرژی و کربن استان‌های با تولید بالا (گروه ۱) و پایین (گروه ۳) باشد. اما، با توجه به ناهمگنی نتایج نمی‌توان ادعا نمود که تولید می‌تواند عامل مهمی در کارایی انرژی و کربن استان‌های با تولید متوسط (گروه ۲) باشد.

نتایج آزمون هم‌انباشتگی ارتباط بلندمدت میان متغیرهای پژوهش را تأیید می‌کند. شدت انرژی تأثیر منفی و معنی‌دار و نوآوری تأثیر مثبت و معنی‌دار بر ETFEE و TFCEE استان‌های ایران دارد. سهم ارزش افزوده صنعت از تولید ناخالص داخلی تأثیر معنی‌داری بر ETFEE و TFCEE استان‌های ایران ندارد.

اصلاح سیاست‌های انرژی، جایگزینی تجهیزات جدید با تجهیزات فرسوده و قدیمی و استفاده از تکنولوژی جدید تولیدی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی در ازای هر واحد تولید (کاهش شدت انرژی) و افزایش کارایی انرژی و کربن کمک نماید. صرف مخارج بیشتر بر تحقیق و توسعه می‌تواند منجر به افزایش نوآوری در تولید شود که به نوبه خود کارایی انرژی و کارایی کربن را افزایش می‌دهد. نوآوری در تولید می‌تواند به صورت تولید بیشتر با همان نهاده تولیدی (انرژی) و یا همان تولید با نهاده تولید کمتر تعبیر شود. پیشنهاد می‌شود که از طریق بهبود بخش تحقیق و توسعه، زمینه‌های جایگزینی تکنولوژی‌های مخرب و آلاینده با تکنولوژی‌های پاک و سازگار با محیط زیست با کمترین هزینه فراهم شده و جریان سرمایه‌گذاری به گونه‌ای مدیریت شود که افزایش کارایی زیست‌محیطی را در پی داشته باشد. دولت باید سیاست‌هایی اتخاذ نماید که توجه هر چه بیشتر به بکارگیری اختراعات و ابداعات و تحقیق و توسعه در دستور کار واحدهای تولیدی در کشور قرار گیرد. حمایت از تحقیق و توسعه داخلی کمک شایانی به ارتقا سطح کارایی انرژی

می‌نماید. در نتیجه تصمیم‌های دولت در زمینه تامین هزینه‌های تحقیق و توسعه می‌تواند مفید باشد. نتایج این مطالعه برای برنامه ریزان اقتصادی و سیاست‌گذاران انرژی و محیط زیست با اهمیت است. انتظار می‌رود توجه به کارایی انرژی منجر به حصول رشد اقتصادی پایدار شود. به عبارتی، با افزایش کارایی انرژی رشد اقتصادی پایدار قابل دستیابی است. این پژوهش با محاسبه دو شاخص کارایی انرژی و کارایی کربن ضمن آنکه بستری برای راستی آزمایی نتایج فراهم می‌کند بلکه همچنین، این امکان را میسر می‌کند که متغیرهای تاثیر گذار بر کارایی را با دو شاخص کارایی شناسایی شود. محدودیت‌های این پژوهش دسترسی به داده‌های استانی برای متغیرهای مهم تأثیر گذار بر کارایی است. پژوهش‌های آتی می‌تواند بر کشور ایران با داده‌های سری زمانی به جای داده‌های استانی متمرکز شود و تاثیر متغیرهای دیگری که داده‌های آنها در سطح کشور در دسترس است بر کارایی بررسی شود.

تضاد منافع

نویسندگان نبود تضاد منافع را اعلام می‌دارند.

فهرست منابع

1. Azar, Sh. (2014). *Analysis of Industrial Energy Efficiency in Iran: Application of Comprehensive Data Analysis*. 12th National Conference on Environment, Energy and Natural Resources (In Persian).
2. 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.
3. Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
4. Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2006). *Introduction to data envelopment analysis and its uses: with DEA-solver software and references*. Boston, MA: Springer US.
5. Färe, R., & Grosskopf, S. (2003). *New directions: efficiency and productivity*. Boston, MA: Springer US.
6. Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the royal statistical society series a: statistics in society*, 120(3), 253-281.
7. Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The review of economics and statistics*, 90-98.
8. Gao, D., Li, G., Li, Y., & Gao, K. (2022). Does FDI improve green total factor energy efficiency under heterogeneous environmental regulation? Evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(17), 25665-25678.
9. Gao, D., Li, G., & Yu, J. (2022). Does digitization improve green total factor energy efficiency? Evidence from Chinese 213 cities. *Energy*, 247, 123395.
10. Gao, D., Li, Y., & Li, G. (2022). Boosting the green total factor energy efficiency in urban China: Does low-carbon city policy matter?. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(37), 56341-56356.
11. Gao, K., & Yuan, Y. (2022). Effects of industrial green total factor energy efficiency on haze abatement: A spatial econometric analysis based on China's 272 cities. *Journal of Environmental Management*, 317, 115399.
12. Guo, W., & Liu, X. (2022). Market fragmentation of energy resource prices and green total factor energy efficiency in China. *Resources Policy*, 76, 102580.
13. Gholamorzanjad, F. (2013). *Investigating the effect of resource abundance on the energy efficiency of educated and uneducated countries*. Third International Conference on Advanced Research in Management and Humanities (In Persian).
14. Goli, Y., & Safari Takhte Shirin, M. (2016). Energy Efficiency Estimation and Factors Affecting It in Iranian Provinces (Tobit Approach), *Economic Strategy*, 5(17), 127-107 (In Persian).
15. Hao, Y., Gai, Z., & Wu, H. (2020). How do resource misallocation and government corruption affect green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy Policy*, 143, 111562.
16. Hu, J. L., & Wang, S. C. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy policy*, 34(17), 3206-3217.
17. Ilyas, H. M. A., Safa, M., Bailey, A., Rauf, S., & Khan, A. (2020). Energy efficiency outlook of New Zealand dairy farming systems: An application of data envelopment analysis (DEA) approach. *Energies*, 13(1), 251.
18. Jafari Samimi, A., Zarouki, Sh., & Amiri Largani, M. (2014). The Impact of Total Energy Subsidy, Renewable and Non-Renewable Energy Subsidies on the Environment in Selected Countries of the World. *Quarterly Journal of Applied Economic Theories*, 11(1), 174-149 (In Persian).
19. Jalairi, M., Vakilpour, M. H., Khalilian, S., & Najafi, H. (2014). Comparison of Technical and Environmental Efficiency of Energy-Intensive Industries in Isfahan Province Nonparametric Stochastic

- Data Envelopment Analysis Approach. *Environmental Science and Technology*, 24(2), 285-300 (In Persian).
20. Jarvis, A., & King, C. W. (2024). Economy-wide rebound and the returns on investment in energy efficiency. *Energy efficiency*, 17(6), 60.
21. Karimi Takanlo, Z., Farhang, A. A. & Mohammadpour, A. (2013). The Effects of Economic Policy Uncertainty, Institutional Quality, and Renewable Energy on Green Growth: A Case Study of Iran. *Journal of Applied Economic Theories*, 10(4), 65-102 (In Persian).
22. Li, L. B., & Hu, J. L. (2012). Ecological total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 46, 216-224.
23. Li, X., & Ma, D. (2021). Financial agglomeration, technological innovation, and green total factor energy efficiency. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4), 4085-4095.
24. Ma, D., Xiong, H., Zhang, F., Gao, L., Zhao, N., Yang, G., & Yang, Q. (2022). China's industrial green total-factor energy efficiency and its influencing factors: A spatial econometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18559-18577.
25. Mohammadzadeh, P., & Najarbazoogh Gharechapagh, H. (2014). Investigating the Impact of ICT on Production Efficiency in Selected Developing Countries. *Journal of Economic Research*, 49(3), 677-698 (In Persian).
26. Moon, H., & Min, D. (2017). Assessing energy efficiency and the related policy implications for energy-intensive firms in Korea: DEA approach. *Energy*, 133, 23-34.
27. Najafi, Z., & Azarbaijani, K. (2019). Investigating Factors Affecting Trade in the Pharmaceutical Industry in Iran and a Selection of Trading Partners (with Emphasis on Innovation). *Quarterly Journal of Economic Research and Policies*, 28(95), 451-413 (In Persian).
28. Nazari, R. A., Nazari, Ta. (2019). *Environmental Efficiency of Energy Using Data Envelopment Analysis in Selected Countries*. 9th National Conference on Geography and Environment (In Persian).
29. Nazemi, A., Mamipour, S., Karimi, F., & Feshari, M. (2019). Energy Efficiency in Iranian Provinces: Data Envelopment Analysis. *Quarterly Journal of Energy Policy Research and Planning*, 5(14), 142-103 (In Persian).
30. Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. *Energy policy*, 24(5), 377-390.
31. Ren, S., Hao, Y., & Wu, H. (2022). The role of outward foreign direct investment (OFDI) on green total factor energy efficiency: Does institutional quality matters? Evidence from China. *Resources Policy*, 76, 102587.
32. Reinhard, S., Lovell, C. K., & Thijssen, G. (1999). Econometric estimation of technical and environmental efficiency: an application to Dutch dairy farms. *American Journal of agricultural economics*, 81(1), 44-60.
33. Schumpeter, J. A. (1950). The march into socialism. *The American Economic Review*, 40(2), 446-456.
34. Sadeghi Khavanedani, M., & Khoshkhoui, M. (2016). Comparative analysis of the role of economic and technical components in improving the energy consumption efficiency of the Iranian household sector. *Quarterly Journal of Economic Modeling Research*, 8(27), 123-175 (In Persian).
35. Salem, A. A., Jabbari, L., & Bayat, Z. (2014). Factors affecting energy efficiency in the industrial sector with emphasis on the threshold effects of road transport infrastructure. *Economic Research*, 22(85), 153-119 (In Persian).
36. Samadi Moghaddam, Y., Hashemzadeh Khorasgani, Gh. R., Radfar, R., & Motaghi, M. (2017). Investigating the importance of the enabling factors of research and development centers on the methods of technology transfer in investment, a case study: Iranian automotive industries. *Investment Knowledge*, 6(22), 101-112 (In Persian).

37. Shakeri, A., Momeni, F., Mohammadi, T., Bahmanpour, H., & Alizadeh, S. (2015). Investigating the effect of trust on innovation in middle-income countries (with emphasis on Fukuyama's radius of distrust). *Financial Economics*, 8(29), 19-48 (In Persian).
38. Shirafkan, M., & Jalaei, S. A. M. (2014). Evaluating the spillover effects of institutional quality on energy efficiency of selected countries: a spatial dynamic panel data approach. *Economic Analysis of Iranian Development*, 9(2), 24-35 (In Persian).
39. Shao, J., & Wang, L. (2023). Can new-type urbanization improve the green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy*, 262, 125499.
40. Tobin, J. (1958). Estimation of relationships for limited dependent variables. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 24-36.
41. Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European journal of operational research*, 130(3), 498-509.
42. Wang, Q., & Zhao, C. (2021). Dynamic evolution and influencing factors of industrial green total factor energy efficiency in China. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1929-1937.
43. Wen, H., Liang, W., & Lee, C. C. (2022). Urban broadband infrastructure and green total-factor energy efficiency in China. *Utilities Policy*, 79, 101414.
44. Wu, H., Hao, Y., & Ren, S. (2020). How do environmental regulation and environmental decentralization affect green total factor energy efficiency: Evidence from China. *Energy Economics*, 91, 104880.
45. Wu, H., Hao, Y., Ren, S., Yang, X., & Xie, G. (2021). Does internet development improve green total factor energy efficiency? Evidence from China. *Energy Policy*, 153, 112247.
46. Zhang, N., & Choi, Y. (2013). Total-factor carbon emission performance of fossil fuel power plants in China: A metafrontier non-radial Malmquist index analysis. *Energy Economics*, 40, 549-559.
47. Yousefi Hajiabad, R. (2016). Assessment of Total Factor Productivity in Iranian Manufacturing Industries. *Economic Policy*, 8(15), 153-175 (In Persian).
48. Zaroki, Sh., & Moghaddisi Sedehi, A. (2014). Energy Price Index and Analysis of Its Nonlinear Effect on Energy Efficiency in Iran with a Sectoral Approach. *Sustainable Economics*, 3(2), 83-109 (In Persian).
49. Zhou, C., & Qi, S. (2022). Has the pilot carbon trading policy improved China's green total factor energy efficiency?. *Energy Economics*, 114, 106268.
50. Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. *Energy economics*, 30(1), 1-14.
51. Zhou, P., Ang, B. W., & Wang, H. (2012). Energy and CO2 emission performance in electricity generation: a non-radial directional distance function approach. *European journal of operational research*, 221(3), 625-635.
52. Zhu, M., Huang, H., & Ma, W. (2023). Transformation of natural resource use: Moving towards sustainability through ICT-based improvements in green total factor energy efficiency. *Resources Policy*, 80, 103228.