The Journal of PLANNING & BUDGETING
Vol. 27 | No. 4 | Winter 2023 | PP 153-176
ISSN: 2251-9092 | doi 10.52547/jpbud.27.4.153

Determining the Amount of Carbon Dioxide Emission from Primary Energy Consumption in Different Production Sectors of Iran: A Multi-Factor Energy Input-Output Analysis

Maryam Jafari Taraji[1] | maryam.taraji@semnan.ac.ir
Majid Maddah[2] | majid.maddah@semnan.ac.ir
Nooraddin Sharify[3] | nsharify@umz.ac.ir

Received: 23/08/2022 | Accepted: 13/02/2023

Abstract This study investigates the impact of final demand change on primary energy consumption, renewable energy consumption, CO_2 emissions, and economic growth. For this purpose, the multi-factor energy input-output method proposed by Guevara and Domingos (2017) has been adopted, and an input-Output table for the year 2016 has been used. The results show that among energy products, electricity has the highest primary energy consumption coefficient. Although the rate of renewable energy consumption in this product is higher than other products, due to the small share of renewable energy consumption in primary energy consumption, electricity has the highest rate of CO_2 emission. Also, the efficiency of primary energy conversion to secondary energy is 24% with the lowest efficiency among energy products. Among non-energy products, non-metallic mineral products and transportation services have the highest primary energy consumption coefficient and CO_2 emission. The results of units' emission production growth of the sectors related to non-energy products show that leather products had the least CO_2 emissions per production growth unit. In contrast, transportation services had the highest emissions per production growth unit.

Keywords: Primary Energy, Renewable Energy, CO_2 Emission, Input-Output Analysis, Energy

JEL Classification: Q41, Q53, O11.

1. Ph.D. in Economics, Faculty of Economics, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Semnan, Iran.
2. Professor, Department of Economics, Faculty of Economics, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Semnan, Iran (Corresponding Author).
3. Associate professor, Department of Economics, Faculty of Economics & Administrative Science, Mazandaran University, Babolsar, Iran.

تعیین میزان انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف انرژی اولیه در بخش‌های مختلف تولیدی در ایران: تحلیل داده-ستانده انرژی چندعاملی[1]

مریم جعفری تراجی | Maryam.taraji@semnan.ac.ir
دکترای اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

مجید مداح | majid.maddah@semnan.ac.ir
استاد گروه علوم اقتصادی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، دانشگاه سمنان،سمنان، ایران (نویسنده مسئول).

نورالدین شریفی | nsharify@umz.ac.ir
دانشیار گروه علوم اقتصادی، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱ | پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

چکیده: این پژوهش در پی بررسی و تحلیل تاثیر تغییر تقاضای نهایی بر مصرف انرژی اولیه، مصرف انرژی تجدیدپذیر، انتشار CO_2 و رشد اقتصادی است. برای این منظور از روش داده-ستانده انرژی چندعاملی و اطلاعات جدول داده-ستانده سال ۱۳۹۵ استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در میان محصولات انرژی، برق دارای بالاترین ضریب مصرف انرژی اولیه است. اگرچه ضریب مصرف انرژی تجدیدپذیر در این محصول نسبت به محصولات دیگر انرژی بالاتر است، اما به دلیل اندک بودن سهم مصرف انرژی تجدیدپذیر از مصرف انرژی اولیه، برق بالاترین میزان انتشار CO_2 را نیز به خود اختصاص داده است. همچنین، کارایی تبدیل انرژی اولیه به ثانویه برق ۲۴ درصد است که پایین‌ترین کارایی را در محصولات انرژی داراست. در میان محصولات غیرانرژی، محصولات کانی غیرفلزی و خدمات حمل‌ونقل بیش‌ترین ضریب مصرف انرژی اولیه و انتشار CO_2 را دارند. نتایج حاصل از انتشار هر واحد رشد تولید بخش‌های مربوط به محصولات غیرانرژی نشان می‌دهد که بخش تولید چرم و محصولات چرمی، کم‌ترین انتشار CO_2 را به‌ازای هر واحد رشد تولید ایجاد می‌کند. در مقابل، خدمات حمل‌ونقل بیش‌ترین انتشار را به‌ازای هر واحد رشد تولید دارد.

کلیدواژه‌ها: انرژی اولیه، انرژی تجدیدپذیر، انتشار CO_2، تحلیل داده-ستانده، انرژی

طبقه‌بندی JEL: Q41, Q53, O11.

۱. مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول در دانشگاه سمنان است.

فصلنامه علمی - پژوهشی برنامه‌ریزی و بودجه | شاپا (چاپی) ۲۲۵۱-۹۰۹۲ | doi 10.52547/jpbud.27.4.153
سال بیست و هفتم | شماره ۴ | زمستان ۱۴۰۱ | ص‌ص ۱۷۶-۱۵۳

مقدمه

در طول دو دهه گذشته، مفهوم توسعه پایدار موضوع اصلی بیش‌تر مباحث بین‌المللی بوده است. از میان ابعاد مختلف توسعه پایدار، کاربرد آن از دیدگاه محیط‌زیست و منابع طبیعی از اهمیت و جایگاه مهمی برخوردار است (Sabour, 2005). در بیش‌تر کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، رشد اقتصادی به عنوان هسته مرکزی برنامه‌ریزی‌ها قلمداد می‌شود. متاسفانه در اغلب موارد، رشد اقتصادی پیامدهای ناگواری، به‌ویژه در زمینهٔ محیط‌زیست و منابع طبیعی، به همراه داشته است (Balali *et al*., 2013).

انرژی یکی از عوامل اصلی رشد و توسعه اقتصادی است که نقش کلیدی در عملکرد بخش‌های مختلف اقتصادی دارد (Chontanawat *et al*., 2006). منابع انرژی اولیه به نوبهٔ خود به سوخت‌های فسیلی و جریان‌های انرژی اولیه تجدیدپذیر تقسیم می‌شوند. تمام انرژی مورد نیاز کشورها، از یکی از این منابع اولیه انرژی حاصل می‌شود. تقریباً ۹۵ درصد انرژی اولیه در جهان از سوخت‌هایی مانند نفت خام، زغال سنگ و گاز طبیعی حاصل می‌شود[1] که همه آن‌ها در هنگام استفاده، گازهای گلخانه‌ای گسترده‌ای تولید می‌کنند. انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث گرم شدن کره زمین خواهد شد.[2] گرمایش زمین یکی از بزرگ‌ترین و احتمالاً دشوارترین تهدیدهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی است که جهان تاکنون در قرن اخیر با آن روبه‌رو بوده است (Shirmohammadi *et al*., 2018). افزایش انتشار دی‌اکسید کربن در جوّ یکی از دلایل اصلی گرم شدن کره زمین با اثرات نامطلوب زیست‌محیطی مانند ذوب شدن یخچال‌های طبیعی و بالا آمدن سطح آب دریاها و اقیانوس‌ها، سیل، و خشکسالی است. میانگین دمای جهانی از سال ۱۸۰۰ به‌طور متوسط ۰/۰۷ درجه سانتیگراد در هر دهه افزایش یافته است. از سال ۱۹۷۰ روند گرم شدن کره زمین سرعت بیش‌تری گرفته است، به‌طوری که درجه حرارت جهانی به‌طور متوسط ۰/۱۷ درجه سانتیگراد در هر دهه افزایش یافته است (NOAA, 2017). این موضوع در جهان بر بهزیستی و معیشت مردم تاثیر خواهد گذاشت. بنابراین، پرداختن به تغییرات آب‌وهوایی، کشورها را ملزم می‌کند که برای اجرای سیاست‌های اقتصادی، مسائل زیست‌محیطی را نیز لحاظ کنند.

در ایران، بحث محیط‌زیست در اسناد بالادستی گنجانده شده است: اسناد بالادستی کشور ایران در حوزه حکمرانی محیط‌زیست را می‌توان در چهار بخش «قانون اساسی»، «سیاست‌های کلی

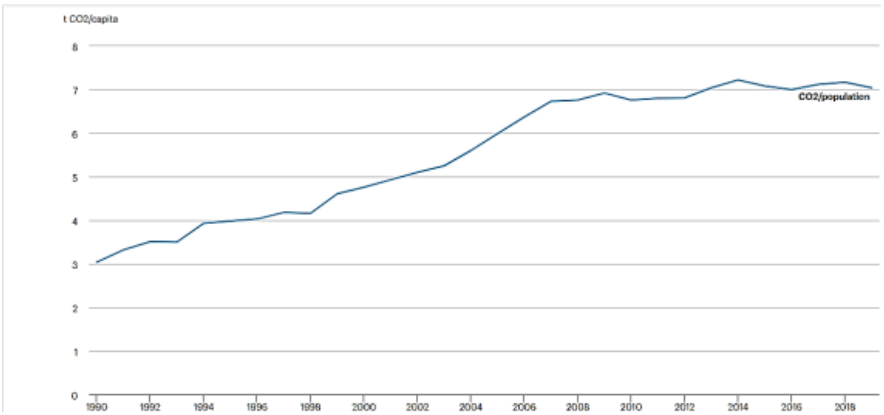
1. https://www.iea.org/
2. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf

محیط‌زیست»، «سند چشم‌انداز افق ۱۴۰۴»، و «سند ملّی محیط‌زیست» طبقه‌بندی نمود.

محیط‌زیست در قانون اساسی ایران از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری که یک اصل به صورت جداگانه و مستقیم به آن اختصاص یافته است (اصل پنجاهم قانون اساسی[1]). این در حالی است که قانون اساسیِ شماری از کشورهای توسعه‌یافته دربارهٔ جایگاه محیط‌زیست سکوت کرده است. با وجود این، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، به نظر می‌رسد این اصل در قانون اساسی تاکنون به‌درستی اجرا نشده است. آمارهای مربوط به مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه در ایران نیز بیانگر این موضوع است، به‌طوری که میزان مصرف انرژی اولیه ایران نسبت به کشورهای خاورمیانه رتبه اول و نسبت به مصرف انرژی اولیه کل کشورها رتبه دهم را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۱۸ کل مصرف انرژی اولیه ایران ۲۸۵/۷ میلیون تن معادل نفت خام (Mtoe) بوده است که از این میزان، سهم نفت خام ۸۶/۲، گاز طبیعی ۱۹۳/۹، زغال سنگ ۱/۵، انرژی هسته‌ای ۱/۶، انرژی برقآبی ۲/۴ و انرژی‌های تجدیدپذیر معادل ۰/۱ میلیون تن نفت خام بوده است (مدیریت تامین و توزیع شرکت ملّی پخش فرآورده‌های نفتی ایران، ۱۳۹۷). همچنین، سرانه مصرف انرژی در ایران ۵۷ درصد بیش‌تر از میانگین جهانی است (World Bank, 2019).

شاخص سرانه انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران طی سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ با تغییر ۵/۲۰- رتبه ۱۵۳ جهانی را در میان ۱۸۰ کشور دارا بوده است (EPI, 2022). بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، ایران یکی از ده کشور اول انتشاردهندهٔ CO_2 در جهان است و در سال ۲۰۱۹، ۵۸۳/۵ میلیون تن CO_2 در جوّ منتشر کرد. سرانه انتشار CO_2 در سال ۲۰۱۹ برابر ۷ (تن/ نفر) بوده است (شکل ۱). بررسی سرانه انتشار کشور ایران برای سال‌های مختلف نشان می‌دهد سرانه انتشار CO_2 روند صعودی داشته است.

۱. اصل ۵۰ قانون اساسی: «در جمهوری اسلامی، حفاظت محیط‌زیست که نسل امروز و نسل‌های بعد باید در آن حیات اجتماعی رو به رشدی داشته باشند، وظیفه عمومی تلقی می‌شود. از این‌رو، فعالیت‌های اقتصادی و غیر آن، که با آلودگی محیط‌زیست یا تخریب غیرقابل جبران آن ملازمه پیدا کند، ممنوع است».



شکل ۱: سرانه انتشار دی‌اکسید کربن در ایران (۲۰۱۹-۱۹۹۰)

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی

با توجه به آثار منفی زیست‌محیطی انتشار CO_2، در صورتی که اصلاحات لازم در زمینهٔ مصرف بهینه انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای انجام نگیرد، جامعه متحمل هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی گسترده‌ای خواهد شد. اصلاح این روند نیازمند بررسی انرژی‌بری و آلایندگی فعالیت‌های مختلف اقتصادی است. از این‌رو، انجام مطالعه‌ای که بتواند تا حدودی سهم نقش کالاها یا فعالیت‌های مختلف تولیدی را در میزان انتشار دی‌اکسید کربن مشخص کند، می‌تواند برای اهداف سیاستگذاری، چه در زمینهٔ وضع مقررات زیست‌محیطی و چه در زمینهٔ انتخاب فناوری تولید، بسیار مفید باشد. اگرچه در این زمینه مطالعاتی در کشور انجام شده (Nasrolahi *et al*., 2011 و صادقی، ۱۳۹۵)، اما شکاف موجود در ادبیات، استفاده از ضریب تاثیر مستقیم روش داده-ستانده انرژی است. این روش در بیش‌تر شرایط با اصل صرفه‌جویی در مصرف انرژی مطابقت ندارد، اما به دلیل ساخت ساده و نیازهای اندک داده، مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرد. نتایج این روش نیز از اطمینان کم‌تری برخوردار است (Miller & Blair, 2009). سهم این پژوهش در پر کردن شکاف موجود، استفاده از روش داده-ستانده انرژی چندعاملی است. این روش علاوه بر این‌که با اصل صرفه‌جویی انرژی مطابقت دارد، نمایش دقیق‌تر و مفصل‌تری از جریان انرژی ارائه می‌دهد. همچنین، با جدا کردن انرژی اولیه از حامل‌های انرژی ثانویه، از شمارش مضاعف گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌کند. بنابراین، نسبت به مطالعات پیشین محاسبات بهتری از انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. سهم دیگر این پژوهش، محاسبه

کارایی تبدیل انرژی اولیه به ثانویه در حامل‌های مختلف انرژی و همچنین بررسی ضریب مصرف انرژی تجدیدپذیر است که در مطالعات داخلی به آن پرداخته نشده است.

مبانی نظری پژوهش

مصرف انرژی، رشد اقتصادی و محیط‌زیست

رشد اقتصادی در تمام بخش‌های اقتصاد با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و استفاده بهینه از منابع، شرط لازم برای رسیدن به توسعه پایدار است. برای رسیدن به رشد اقتصادی پایدار لازم است نهاده‌هایی چون سرمایه، نیروی کار و انرژی به شیوه‌ای سازگار با محیط‌زیست با هم ترکیب شوند. بر اساس ادبیات نظری مدل‌های رشد در مورد سازوکار تاثیرگذاری مصرف انرژی بر رشد اقتصادی دیدگاه‌های متفاوتی وجود دارد. بر اساس نظرات اقتصاددانان نئوکلاسیک، انرژی از عوامل اصلی در تابع تولید است. برای مثال، برنت و وود[1] (۱۹۷۵)، استدلال می‌کنند که در تابع تولید کل، انرژی یک عامل تولید است، که ارتباط ضعیفی با نیروی کار دارد. آن‌ها تابع تولید را به این صورت نشان می‌دهند:

$$Q= F(H(K,E),L)$$

Q: تابع تولید کل، K: سرمایه، E: انرژی و L: نیروی کار است.

گروهی از اقتصاددانان نئوکلاسیک مانند برنت (۱۹۷۸) و دنیسون[2] (۱۹۷۹) اعتقاد دارند عوامل تولید تنها نیروی کار و سرمایه هستند و انرژی یک نهادهٔ واسطه است و نقش کوچکی در تولید اقتصادی دارد. در این تابع، انرژی و سرمایه با هم ترکیب می‌شود و تولید H را ایجاد می‌کند و پس از ترکیب H با نیروی کار، محصول کل به‌دست می‌آید. بنابراین، انرژی ارتباط ضعیفی با نیروی کار دارد. اقتصاددانان اکولوژیک مانند آیرس و نایر[3] (۱۹۸۴) بیان می‌کنند انرژی تنها عامل و مهم‌ترین عامل رشد است و نیروی کار و سرمایه، عوامل واسطه‌ای هستند که برای به‌کارگیری به انرژی نیاز دارند. استرن[4] (۲۰۰۴)، از طرفداران مکتب نئوکلاسیک، تابع تولیدی معرفی کردند که در این تابع رابطه بین انرژی و تولید کل به وسیله عواملی از قبیل جانشینی بین انرژی و دیگر نهاده‌ها، تغییر

1. Berndt & Wood
2. Denison
3. Ayres & Nair
4. Stern

ترکیب عوامل انرژی، تغییرات فناورانه و تغییر ترکیب محصولات تولیدی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، تداوم تولید نیازمند مصرف انرژی است، این در حالی است که انتشار آلاینده‌ها به عنوان محصول جانبی هر فرایند تولیدی، اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، همگام با رشد اقتصادی، مصرف انرژی به آلودگی محیط‌زیست منجر خواهد شد. سیاست‌های اتخاذی در بخش انرژی و محیط‌زیست ارتباط نزدیکی با هم دارند و بخش انرژی بیش‌ترین نقش را در تغییر شرایط محیط‌زیست ایفا می‌کند (Shim, 2006).

سه جریان فکری کلی در حوزه ارتباط رشد اقتصادی و کیفیت زیست‌محیطی وجود دارد. در رویکرد اول این اعتقاد وجود دارد که رشد اقتصادی و در نتیجه افزایش تولید و مصرف، نیازمند مواد اولیه و انرژی بیش‌تر است که باعث آلودگی بیش‌تر نیز می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش سطح درآمد در فرایند رشد اقتصادی سبب به‌کارگیری بیش‌تر منابع طبیعی و متعاقب آن تخریب بیش‌تر محیط‌زیست می‌شود. به همین دلیل، رشد فعالیت‌های اقتصادی از این جهت، نوعی خطر محسوب می‌شود. بنابراین، سیاستگذاران یا باید برای دستیابی به رشد اقتصادی بالاتر، خطرات زیست‌محیطی را بپذیرند یا برای حفظ محیط‌زیست به سطح پایین‌تر رشد اقتصادی رضایت دهند.

در رویکرد دوم اعتقاد بر این است که سطح درآمد بالاتر، سبب افزایش تقاضا برای کالاهایی می‌شود که مواد اولیه کم‌تری نیاز دارند. این باعث کیفیت محیط‌زیست می‌شود. به عبارتی، قرار گرفتن در مسیر رشد اقتصادی سبب بهبود استانداردهای زیست‌محیطی می‌شود.

در رویکرد سوم، این اعتقاد وجود دارد که رشد اقتصادی در ابتدا باعث افزایش تخریب محیط‌زیست می‌شود تا این‌که به نقطه بیشینهٔ [= ماکزیمم] خود می‌رسد. سپس در مرحله بالاتر، رشد تخریب محیط‌زیست کاهش می‌یابد. در این رویکرد، ارتباط بین رشد اقتصادی و آلودگی زیست‌محیطی به صورت U معکوس بیان می‌شود که بیانگر فرضیه منحنی زیست‌محیطی کوزنتس است.

در مجموع، نحوهٔ اثرگذاری رشد اقتصادی بر محیط‌زیست به سه بخش اثر مقیاس، اثر ساختاری، و اثر فناوری تقسیم می‌شود. اثر مقیاس با سطح معینی از فناوری، ثبات نسبت نهاده‌ها، و افزایش سطح تولید باعث افزایش تخریب محیط‌زیست می‌شود. در اثر ساختاری، با افزایش نسبت نهاده‌های مضر برای محیط‌زیست، اثر تخریبی رشد اقتصادی بر محیط‌زیست افزایش می‌یابد. اثر فناوری مانند پیشرفت فناوری، باعث می‌شود که ضایعات تولید کاهش یابد و آسیب بر محیط‌زیست کم شود. همچنین، با افزایش کارایی تولید میزان استفاده از نهاده‌های زیست‌محیطی در تولید یک محصول کاهش می‌یابد (Stern, 1998).

پیشینهٔ تجربی

مطالعات نسبتاً زیادی در زمینهٔ روابط متقابل فعالیت‌های اقتصادی، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در داخل و خارج از کشور انجام گرفته است که از جهات مختلف حائز اهمیت هستند. در یک تقسیم‌بندی کلی، بخشی از این مطالعات به روش داده-ستانده انجام شده است (Nasrolahi *et al*., 2011; Torabi & Varesi, 2009; Kunanuntakij *et al*., 2017; Guo *et al*., 2018; Ramos *et al*., 2019). بخش دیگر مطالعات نیز با استفاده از روش‌های دیگر، به‌ویژه روش اقتصادسنجی انجام گرفته است (Darvishi *et al*., 2021; Sadeghi *et al*., 2021; Uz Zaman *et al*., 2021; Eslami Giski *et al*., 2022; Qayyum *et al*., 2022).

در مطالعات انجام‌شده به روش داده-ستانده، تفاوت‌هایی دیده می‌شود، به‌گونه‌ای که برخی از آن‌ها به بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک بخش خاص، مثل بخش صنعت، پرداختند (Torabi & Varesi, 2009; Liu *et al*., 2018). برخی دیگر از مطالعات میزان انتشار آلاینده‌ها را در روابط بین‌المللی مورد بررسی قرار داده‌اند. برای مثال بانویی و کمال (۲۰۱۴) به بررسی میزان انتشار مستقیم و غیرمستقیم CO_2 تولید محصولات صادراتی و واردات کشور ایران می‌پردازند. شیا و همکاران[1] (۲۰۱۵) نیز با در نظر گرفتن انرژی و کربن موجود در بخش‌های صادراتی چین، اثرات برون‌سپاری را بر انتشار خالص دی‌اکسید کربن برآورد می‌کنند.

مطالعات جعفری صمیمی و نجاری (۲۰۱۹) از جمله مطالعاتی است که با استفاده از رهیافت SDA به ارزیابی سهم عوامل موثر بر تغییرات آلایندگی بخش صنعت پرداختند و از جدول داده-ستانده ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ استفاده شده است. رادون و همکاران[2] (۲۰۲۲) نیز با استفاده از روش SDA مصرف انرژی و محرک‌های انتشار CO_2 ناشی از تغییرات در اقتصاد گسترده مصر، به‌ویژه در بخش کشاورزی، را برای سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۷۲ مورد بررسی قرار داده‌اند.

روش‌شناسی پژوهش

در مدل داده-ستانده انرژی چندعاملی، که توسط گوارا و دومینگو[3] (۲۰۱۷) پیشنهاد شده است، نیاز به جدول مصرف و عرضه پولی (ارزشی) و جدول مصرف و عرضه انرژی در واحد فیزیکی است.

1. Xia *et al*.
2. Radwan *et al*.
3. Guevara & Domingos

تجزیه و تحلیل داده-ستانده پولی (ارزشی)

جدول داده-ستانده با استفاده از دو ماتریس جذب ($U=[u_{ij}]$) و ماتریس ساخت ($V=[v_{ij}]$) تهیه می‌شود. u_{ij} عناصر ماتریس جذب، مقدار محصول i است که توسط بخش j مورد استفاده قرار می‌گیرد. v_{ij} نیز عناصر ماتریس ساخت، مقدار محصول j است که توسط بخش i تولید می‌شود. با فرض این‌که x_i ستانده کل بخش i و q_j تولید کل محصول j باشد، ماتریس ضرایب فنی با استفاده از روابط (۱) و (۲) به‌دست می‌آید:

$$\mathbf{B}^{M} = \mathbf{U}^{M} (\widehat{x^{M}})^{-1} \quad (۱)$$

$$\mathbf{D}^{M} = \mathbf{V}^{M} (\widehat{q^{M}})^{-1} \quad (۲)$$

M نشان‌دهندهٔ اندازه‌گیری متغیرها با واحدهای پولی و ارزشی است. $\mathbf{B}^{M} = [b_{ij}]$ ماتریس ضرایب فنی جدول جذب، $\mathbf{D}^{M} = [d_{ij}]$ ماتریس سهم بازار، x^{M} بردار ستونی ارزش ستانده کل بخش‌های تولیدی، و $(\widehat{x^{M}})^{-1}$ معکوس ماتریس قطری آن است. q^{M} بردار ستونی ارزش تولید محصولات و $(\widehat{q^{M}})^{-1}$ معکوس ماتریس قطری تولید محصولات مختلف را نشان می‌دهد. با استفاده از ماتریس ضرایب فنی جذب و ماتریس سهم بازار، ماتریس ضرایب فنی جدول متقارن کالا در کالا حاصل می‌شود که با استفاده از رابطه (۳) نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{A}^{M} = \mathbf{B}^{M}\mathbf{D}^{M} \quad (۳)$$

$\mathbf{A}^{M} = [a_{ij}]$ ماتریس ضرایب فنی جدول متقارن کالا در کالاست که عناصر آن میزان کالای i مورد نیاز را در تولید هر واحد کالای j نشان می‌دهد.

$$\ddot{\mathbf{L}}^{M} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{M})^{-1} \quad (۴)$$

$\ddot{\mathbf{L}}^{M} = [l_{ij}]$ ماتریس معکوس لئونتیف است که یک ماتریس کالا در کالا با ابعاد P×P است. P تعداد کل کالای انرژی و غیرانرژی طبق جدول ارزشی است. عناصر این ماتریس، میزان نیاز مستقیم و غیرمستقیم تولید کالای i را برای تولید یک واحد کالای نهایی j نشان می‌دهد. برای ایجاد ارتباط بین کالاها با بخش‌ها، از رابطه (۵) استفاده می‌شود:

$$\dot{\mathbf{L}}^{M} = \mathbf{D}^{M} (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{M})^{-1} \quad (۵)$$

ماتریس $\dot{\mathbf{L}}^{M}$ نشان می‌دهد به‌ازای هر واحد تقاضای نهایی از یک کالا، چه مقدار در بخش‌های مختلف تولید می‌شود. این ماتریس یک ماتریس بخش در کالا با ابعاد K×P است.

تجزیه‌وتحلیل داده-ستانده فیزیکی

همانند روابط پولی (۱) و (۲)، روابط انرژی (۶) و (۷) به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\mathbf{B}^{E} = \mathbf{U}_{e}^{E} (\widehat{x^{E}})^{-1} \quad (۶)$$

$$\mathbf{D}^{E} = \mathbf{V}^{E} (\widehat{q^{E}})^{-1} \quad (۷)$$

$\mathbf{B}^{E} = [b_{ij}^{e}]$ ماتریس ضرایب فنی جدول جذب است. عناصر آن نشان می‌دهد که برای تولید هر واحد کالای انرژی در بخش j، b_{ij}^{e} واحد از کالای انرژی i مورد نیاز است. عناصر ماتریس $\mathbf{D}^{E} = [d_{ij}^{e}]$ سهم بخش انرژی i را در بازار تولید انرژی j نشان می‌دهد. E و e نشان‌دهندهٔ اندازه‌گیری متغیرها با واحدهای فیزیکی است.

$$\mathbf{A}^{E}=\mathbf{B}^{E}\mathbf{D}^{E} \quad (۸)$$

$\mathbf{A}^{E} =[a_{ij}^{e}]$ ماتریس ضرایب فنی جدول متقارن کالا در کالاست که عناصر آن میزان انرژی i مورد نیاز را در تولید هر واحد انرژی j نشان می‌دهد.

$$\ddot{\mathbf{L}}^{E} =(\mathbf{I}-\mathbf{A}^{E})^{-1} \quad (۹)$$

ماتریس معکوس لئونتیف انرژی $\ddot{\mathbf{L}}^{E}$، یک ماتریس کالا در کالا با ابعاد ḿ×ḿ است. ḿ تعداد کل کالای انرژی در جدول فیزیکی است. عناصر این ماتریس l_{ij}^{E} میزان نیاز مستقیم و غیرمستقیم تولید انرژی i را برای تولید یک واحد کالای نهایی از انرژی j نشان می‌دهد. این عامل تقاضای انرژی مستقیم و نهایی را با کل نیازهای انرژی اولیه و ثانویه فرایندهای تولیدی، که در بخش انرژی انجام می‌شود، مرتبط می‌سازد. بنابراین، ساختار و کارایی فرایندهای تبدیل اولیه به ثانویه در اقتصاد و به‌طور خاص ساختار ترکیبی از انرژی در سطح اولیه مصرف انرژی را بر اساس نوع فناوری‌های تبدیل اولیه به ثانویه در بخش انرژی مشخص می‌کند.

بخش‌های غیرانرژی جدول انرژی با ماتریس $\mathbf{U}_{ne}^{E} = [u_{ij}^{e}]$ نشان داده می‌شود که u_{ij}^{e} عناصر این ماتریس، مقدار استفاده از محصول انرژی iام در بخش غیرانرژی jاست. بنابراین، از جمع ستون‌های ماتریس $\mathbf{U}_{ne}^{E}$، بردار تقاضای مستقیم انرژی با ابعاد ۱×(ḱ-ń) حاصل می‌گردد که با $\mathbf{r}^{E} = [r_{i}^{e}]$ نشان داده می‌شود. k' تعداد کل بخش‌های انرژی و غیرانرژی و n' تعداد بخش‌های انرژی است. بنابراین، (ḱ-ń) تعداد بخش‌های غیرانرژی را نشان می‌دهد:

$$\mathbf{r}^{E} =\mathrm{i}\, \mathbf{U}_{ne}^{E} \quad (۱۰)$$

i بردار یکه سطری است. برای ایجاد ارتباط بین محصولات انرژی با بخش‌های غیرانرژی، با

پیش‌ضرب ماتریس $\mathbf{U}^{E}_{ne}$ در معکوس ماتریس قطری $\mathbf{r}^{E}$ در رابطه (۱۱)، ماتریس تقاضای مستقیم انرژی حاصل می‌شود:

$$\mathbf{C}^{E} = \mathbf{U}^{E}_{ne} \, (\widehat{\mathbf{r}^{E}})^{-1} \qquad (۱۱)$$

$\mathbf{C}^{E} = [c^{e}_{ij}]$ ماتریس تقاضای مستقیم انرژی با ابعاد $\acute{m} \times (\acute{k}\text{-}\acute{n})$ است که ترکیب استفاده مستقیم انرژی توسط بخش‌های غیرانرژی را نشان می‌دهد. به این ترتیب، برای تولید هر واحد کالا در بخش غیرانرژی j، c^{e}_{ij} واحد از کالای انرژی i مورد نیاز است.

ارتباط مدل داده-ستانده بخش انرژی با بقیه اقتصاد از طریق وارد کردن بقیه اقتصاد به مدل بخش انرژی، از رابطه شدت انرژی مستقیم حاصل می‌شود که در رابطه (۱۲) نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{T}^{E} = \widehat{\mathbf{r}^{E}} \, (\widehat{\mathbf{x}'^{M}})^{-1} \qquad (۱۲)$$

$\mathbf{T}^{E}$ ماتریس شدت انرژی مستقیم است که یک ماتریس قطری با ابعاد $(\acute{k}\text{-}\acute{n}) \times (\acute{k}\text{-}\acute{n})$ است. عناصر آن t^{E}_{jj}، مقدار مصرف مستقیم انرژی در واحدهای فیزیکی به‌ازای هر واحد ستانده در واحدهای پولی بخش غیرانرژی j را نشان می‌دهد که این عامل در بیش‌تر مطالعات داده-ستانده انرژی به عنوان یک شاخص کارایی انرژی در نظر گرفته می‌شود. $\mathbf{x}'^{M}$ بردار ستونی ستانده کل بخش غیرانرژی در جدول پولی با ابعاد $1 \times (p\text{-}m)$ است. m تعداد کالاهای انرژی در جدول ارزشی است. این بردار با استفاده از رابطه (۱۳) به‌دست می‌آید:

$$\mathbf{x}'^{M} = \mathbf{L}^{S} \, \mathbf{f}^{M}_{ne} \qquad (۱۳)$$

$\mathbf{L}^{S}$ ماتریس معکوس لئونتیف است که سطرها و ستون‌های بخش انرژی در آن حذف شده است. ابعاد این ماتریس $(p\text{-}m) \times (p\text{-}m)$ است، $\mathbf{f}^{M}_{ne}$ بردار تقاضای نهایی غیرانرژی با ابعاد $1 \times (p\text{-}m)$ است. در رابطه (۹)، کل نیازهای انرژی بخش‌های انرژی و غیرانرژی مشخص شده است. برای محاسبه کل انرژی باید ارتباط با بقیه اقتصاد نیز در نظر گرفته شود، یعنی نیازهای غیرانرژی بخش‌های انرژی و غیرانرژی نیز لحاظ گردد. بنابراین، ماتریس ضرایب فنی که از رابطه (۵) حاصل شده است، به چهار زیرماتریس تقسیم می‌شود:

$$\dot{\mathbf{L}}^{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\alpha} & \mathbf{L}_{\Pi} \\ \mathbf{L}_{\beta} & \mathbf{L}_{\phi} \end{bmatrix} \qquad (۱۴)$$

$\mathbf{L}_{\alpha}$ زیرماتریس کل انرژی مورد نیاز (اولیه و ثانویه) بخش انرژی به‌ازای هر واحد تقاضای نهایی انرژی، $\mathbf{L}_{\Pi}$ زیرماتریس کل نیاز انرژی بخش غیرانرژی به‌ازای هر واحد تقاضای نهایی غیرانرژی، $\mathbf{L}_{\beta}$ زیرماتریس کل نیاز غیرانرژی بخش انرژی به‌ازای هر واحد تقاضای نهایی انرژی، و $\mathbf{L}_{\phi}$ زیرماتریس کل نیاز غیرانرژی بخش غیرانرژی به‌ازای هر واحد تقاضای نهایی غیرانرژی است. با توجه به نیاز غیرانرژی

($\mathbf{L}_{\phi}$،$\mathbf{L}_{\beta}$)، بردار کل انرژی (اولیه و ثانویه) مورد نیاز در واحد فیزیکی ($\mathbf{q}^{E}$) با ابعاد $\acute{m} \times 1$ با استفاده از رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$\mathbf{q}^{E} = \ddot{\mathbf{L}}^{E}\,\mathbf{C}^{E}\,\mathbf{T}^{E}\,\mathbf{L}_{\phi}\,\mathbf{f}_{ne}^{M} + (\ddot{\mathbf{L}}^{E} + \ddot{\mathbf{L}}^{E}\mathbf{C}^{E}\mathbf{T}^{E}\,\mathbf{L}_{\beta}\mathrm{B})\,\mathbf{f}^{E} \qquad (۱۵)$$

$\mathbf{f}_{ne}^{M}$ بردار تقاضای نهایی غیرانرژی برحسب واحد پولی با ابعاد $1\times$ (p-m)، $\mathbf{f}^{E}$ بردار تقاضای نهایی انرژی برحسب واحد فیزیکی با ابعاد $1\times \acute{m}$ و B متوسط قیمت انرژی در اقتصاد است. قسمت اول رابطه (۱۵) مقدار انرژی مورد نیاز برای تقاضای نهایی غیرانرژی و قسمت دوم این رابطه، مقدار انرژی مورد نیاز به‌ازای تقاضای نهایی انرژی را نشان می‌دهد. $\mathbf{L}_{\beta}$ در اکثر موارد نسبتاً کوچک است و باعث می‌شود مقدار $\ddot{\mathbf{L}}^{E}\mathbf{C}^{E}\mathbf{T}^{E}\,\mathbf{L}_{\beta}\mathrm{B}$ ناچیز و بی‌اهمیت شود (Guevara & Domingos, 2017).

ضرایب داده-ستانده انرژی چندعاملی[۱]

ضرایب اثرات تولید کل اقتصاد، مصرف انرژی و سایر شاخص‌های اقتصادی و محیطی ناشی از تغییر یک واحد تقاضای نهایی برای یک محصول خاص را نشان می‌دهند.

ضریب تولید کل در واحد پولی

با توجه به مدل پایه داده-ستانده، ضریب تولید کل به صورت مجموع ستونی ماتریس معکوس لئونتیف محاسبه می‌شود. برای این منظور، TP_{e} و TP_{ne} به‌ترتیب ضرایب تولید بخش‌های انرژی و غیرانرژی در واحد پولی هستند که پیش‌ضرب $\mathbf{i}$، بردار یکه سطری $\dot{\mathbf{i}}$ در روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌گردند:

$$TP_{e} = \mathbf{i}\,\mathbf{L}_{\alpha} + \mathbf{i}\,\mathbf{L}_{\beta} \qquad (۱۶)$$

$$TP_{ne} = \mathbf{i}\,\mathbf{L}_{\Pi} + \mathbf{i}\,\mathbf{L}_{\phi} \qquad (۱۷)$$

ضریب مصرف انرژی اولیه و تجدیدپذیر

بردار انرژی کل ($\mathbf{q}^{E}$)، هر دو جریان انرژی اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد که باید با استفاده از

۱. در این پژوهش، از روابط معرفی‌شده توسط باقری و همکاران (۲۰۱۸) در کانادا استفاده شده است. با این حال، با بسط بخش انرژی، مصارف غیرانرژی بخش انرژی که در کار فوق‌الذکر نادیده گرفته شده بود، مورد توجه قرار گرفته است.

ضرایب انرژی اولیه (k_p) از هم جدا شوند.

$$k_p=\left(\widehat{d^E}+\widehat{m^E}\right)\widehat{q^E}^{-1} \quad (۱۸)$$

در رابطه (۱۸)، d^E بردار انرژی اولیه داخلی، m^E بردار انرژی اولیه و ثانویه وارداتی، و q^E ستانده کل انرژی است. k_p ضریب انرژی اولیه است که به صورت یک ماتریس قطری با ابعاد $\acute{m}\times\acute{m}$ است (Guevara & Domingos, 2017). بنابراین، بردار مصرف انرژی اولیه (PEC) با استفاده از رابطه (۱۹) قابل‌محاسبه است.

$$PEC = k_p\,(\ddot{\mathbf{L}}^E\,\mathbf{C}^E\,\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\phi)\,\mathbf{f}_{ne}^m + k_p\,(\ddot{\mathbf{L}}^E+\ddot{\mathbf{L}}^E\mathbf{C}^E\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\beta\mathbf{B})\bar{\mathbf{f}}^E \quad (۱۹)$$

$\bar{\mathbf{f}}^E$ بردار تقاضای نهایی داخلی است که با کم کردن مقدار صادرات از تقاضای نهایی ($\bar{\mathbf{f}}^E = \mathbf{f}^E - \boldsymbol{ex}$) محاسبه می‌شود. ضرایب PEC افزایش مصرف انرژی اولیه را در اثر یک واحد تغییر در تقاضای نهایی نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۱۹)، ضرایب مصرف انرژی اولیه (PEC^e) برای تقاضای نهایی انرژی و ضرایب انرژی اولیه (PEC^{ne}) برای تقاضای نهایی غیرانرژی به صورت روابط (۱۹الف) و (۱۹ب) مشخص می‌شوند.

$$\mu\,(PEC^e) = k_p\,(\ddot{\mathbf{L}}^E+\ddot{\mathbf{L}}^E\mathbf{C}^E\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\beta\mathbf{B}) \quad (۱۹\text{ الف})$$

$$\mu\,(PEC^{ne}) = k_p\,(\ddot{\mathbf{L}}^E\,\mathbf{C}^E\,\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\phi) \quad (۱۹\text{ ب})$$

به‌طور مشابه k_r، ضرایب انرژی تجدیدپذیر است که با جایگزینی k_r با k_p در رابطه (۲۰)، انرژی‌های تجدیدپذیر به‌دست می‌آید:

$$REC = k_r\,(\ddot{\mathbf{L}}^E\,\mathbf{C}^E\,\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\phi)\,\mathbf{f}_{ne}^m + k_r\,(\ddot{\mathbf{L}}^E+\ddot{\mathbf{L}}^E\mathbf{C}^E\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\beta\mathbf{B})\bar{\mathbf{f}}^E \quad (۲۰)$$

روابط (۲۰الف) و (۲۰ب) نیز ضرایب مصرف انرژی تجدیدپذیر (REC^e) را برای تقاضای نهایی انرژی و ضرایب انرژی تجدیدپذیر (REC^{ne}) برای تقاضای نهایی غیرانرژی نشان می‌دهند.

$$\mu\,(REC^e) = k_r(\ddot{\mathbf{L}}^E+\ddot{\mathbf{L}}^E\mathbf{C}^E\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\beta\mathbf{B}) \quad (۲۰\text{ الف})$$

$$\mu\,(REC^{ne}) = k_r\,\ddot{\mathbf{L}}^E\,\mathbf{C}^E\,\mathbf{T}^E\,\mathbf{L}_\phi \quad (۲۰\text{ ب})$$

ضریب تولید انرژی اولیه

رابطه (۲۱) تولید انرژی اولیه (PEP) را مشخص می‌کند که سهم بخش‌های انرژی اولیه داخلی را در برآورد مصرف انرژی اولیه نشان می‌دهد. در رابطه (۲۱)، $\widehat{\mathbf{L}}^E$ ماتریس معکوس لئونتیف با ابعاد $\acute{m}\times\acute{m}$

است که فقط تولیدات انرژی داخلی (بدون واردات) را با استفاده از جدول اصلاح‌شده انرژی محاسبه می‌کند.

$$PEP = k_p \, \breve{\mathbf{L}}^{E} \, \mathbf{C}^{E} \, \mathbf{T}^{E} \, \mathbf{L}_{\phi} \, \mathbf{f}_{ne}^{m} + k_p \, (\breve{\mathbf{L}}^{E} + \breve{\mathbf{L}}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{C}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{T}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{L}_{\beta} \, \boldsymbol{B}) \, \bar{\mathbf{f}}^{\mathbf{E}} \qquad (۲۱)$$

ضرایب تولید انرژی اولیه برای تقاضای نهایی انرژی و تقاضای نهایی غیرانرژی با استفاده از رابطه‌های (۲۱الف) و (۲۱ب) محاسبه می‌شود:

$$\mu\,(PEP^{e}) = k_p \, (\breve{\mathbf{L}}^{E} + \breve{\mathbf{L}}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{C}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{T}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{L}_{\beta} \, \boldsymbol{B}) \qquad (۲۱ \text{ الف})$$

$$\mu\,(PEP^{ne}) = k_p \, \breve{\mathbf{L}}^{E} \, \mathbf{C}^{E} \, \mathbf{T}^{E} \, \mathbf{L}_{\phi} \qquad (۲۱ \text{ ب})$$

ضریب انتشار CO_2 از انرژی اولیه

انتشار گازهای گلخانه‌ای از کل مصرف انرژی اولیه محاسبه می‌شود. برای جلوگیری از احتساب مضاعف، به دلیل این‌که CO_2 ناشی از جریان‌های انرژی ثانویه به‌طور غیرمستقیم در انتشار CO_2 حاصل از جریان‌های اولیه مورد محاسبه قرار می‌گیرد، انتشار CO_2 از جریان‌های انرژی ثانویه محاسبه نمی‌شود. برای این منظور، بردار k_{CO2} که عناصر آن نشان‌دهندهٔ میزان انتشار CO_2 به‌ازای سوختن هر واحد از سوخت‌های مختلف است، معرفی می‌گردد. برای یکنواخت کردن واحد سنجش سوخت‌های مختلف، از ضرایب تبدیل واحدهای متعارف به یکدیگر استفاده می‌شود که میزان مصرف همه سوخت‌ها به واحد اندازه‌گیری ارزش حرارتی آن‌ها در مقیاس 10^{12}، یعنی تری‌ژول (TJ) سنجیده می‌شود. با ضرب بردار k_{CO2} (تری‌ژول/ تن) در رابطه (۱۹)، مجموع گازهای گلخانه‌ای ناشی از انرژی محاسبه می‌شود:

$$CO_2 = k_{CO2} \, k_p \, \ddot{\mathbf{L}}^{E} \, \mathbf{C}^{E} \, \mathbf{T}^{E} \, \mathbf{L}_{\phi} \, \mathbf{f}_{ne}^{m} + k_{CO2} \, k_p \, (\ddot{\mathbf{L}}^{E} + \ddot{\mathbf{L}}^{\mathbf{E}} \mathbf{C}^{\mathbf{E}} \mathbf{T}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{L}_{\beta} \mathbf{B}) \bar{\mathbf{f}}^{\mathbf{E}} \qquad (۲۲)$$

ضرایب CO_2 کل تغییرات در انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌ازای یک واحد افزایش در تقاضای نهایی اندازه‌گیری می‌کند. روابط (۲۲الف) و (۲۲ب) به‌ترتیب ضرایب CO_2 را برای تقاضای نهایی انرژی و غیرانرژی نشان می‌دهد.

$$\mu\,(CO_2^{e}) = k_{CO2} \, k_p \, (\ddot{\mathbf{L}}^{E} + \ddot{\mathbf{L}}^{\mathbf{E}} \mathbf{C}^{\mathbf{E}} \mathbf{T}^{\mathbf{E}} \, \mathbf{L}_{\beta} \mathbf{B}) \qquad (۲۲ \text{ الف})$$

$$\mu\,(CO_2^{ne}) = k_{CO2} \, k_p \, \ddot{\mathbf{L}}^{E} \, \mathbf{C}^{E} \, \mathbf{T}^{E} \, \mathbf{L}_{\phi} \qquad (۲۲ \text{ ب})$$

داده‌های آماری

آمار و اطلاعات مورد نیاز مربوط به جدول در واحد پولی (ارزشی)، از جدول داده-ستانده سال ۱۳۹۵ بانک مرکزی ایران[1] که آخرین اطلاعات آماری در دسترس است، استفاده شده است. آمارهای مربوط به ساخت جدول انرژی از ترازنامه هیدوکربوری سال ۱۳۹۵[2] استخراج شده است. یکی از محدودیت‌های این پژوهش فقدان آمارهای تفصیلی مصرف انرژی در ترازنامه‌های انرژی بود. برای رفع این محدودیت، از آمارهای جانبی نظیر طرح آمارگیری از معادن در حال بهره‌برداری سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران[3] و همچنین از نتایج طرح آمارگیری کارگاه‌های صنعتی ۱۰ نفر کارکن و بیش‌تر مرکز آمار استفاده شده است. علاوه بر این، به دلیل وجود برخی تفاوت‌ها در تعاریف بخش‌هایی نظیر صنعت، لازم بود پیش از هر نوع محاسبه، سازگاری لازم بین تعاریف‌های موجود صورت گیرد. در نهایت، پس از به‌کارگیری معیارهای فنی و اقتصادی لازم، جدول انرژی داده-ستانده تهیه گردید که شامل ۱۰ بخش انرژی، ۲۲ بخش غیرانرژی، و ۱۸ محصول انرژی است. اطلاعات مربوط به قیمت سوخت‌های فسیلی از ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۵ وزارت نیرو[4] گرفته شده است. معادل انرژی اولیه برای جریان‌های تجدیدپذیر با روش محتوی فیزیکی باتاکاریا[5] (۲۰۱۹) و برای جریان‌های انرژی ثانویه وارداتی با فرض فناوری داخلی برآورد شده است. ضرایب انتشار دی‌اکسید کربن نیز از دستورالعمل هیئت بین‌الدول تغییرات آب‌وهوایی اخذ گردیده است.

تحلیل ضرایب محاسبه‌شده

تحلیل ضرایب محصولات انرژی

بر اساس جدول (۱)، اگر تقاضای نهایی برای برق یک تریژول[6] افزایش یابد، کل مصرف انرژی اولیه[7] در اقتصاد ۴/۱۰۴ تریژول افزایش می‌یابد که سهم افزایش انرژی اولیه داخلی در تامین انرژی اولیه مورد

1. https://www.cbi.ir/simplelist/2861.aspx
2. http://www.iranenergyinfo.ir
3. https://www.amar.org.ir
4. https://pep.moe.gov.ir
5. Bhattacharyya

۶. هر تریژول معادل 10^{12} ژول است.

۷. زغال سنگ، نفت خام، گاز طبیعی، انرژی هسته‌ای، انرژی آب، انرژی باد، بیوگاز، و سوخت‌های زیستی جامد انرژی‌های اولیه مورد استفاده در این پژوهش هستند.

نیاز، ۳/۹۲۳ تری‌ژول است. به عبارت دیگر، یک تری‌ژول افزایش در تقاضای نهایی برق، واردات انرژی اولیه را ۰/۱۸۱ تری‌ژول افزایش می‌دهد. در بین محصولات انرژی، بیش‌ترین ضریب مصرف انرژی تجدیدپذیر مربوط به برق است، به‌طوری که یک تری‌ژول افزایش تقاضای برق باعث افزایش ۰/۰۵۸ تری‌ژول در مصرف انرژی تجدیدپذیر می‌شود. در ایران بخش زیادی از برق مورد نیاز کشور در نیروگاه‌های حرارتی تولید می‌شود. سهم اندک نیروگاه‌های تجدیدپذیر در تولید برق ایران و همچنین وجود انرژی‌های ارزان‌قیمت فسیلی، باعث شده است که بیش‌ترین ضریب انتشار دی‌اکسید کربن نیز به برق اختصاص داده شود. به‌طور خاص، یک تری‌ژول افزایش تقاضای نهایی برق باعث افزایش ۲۲۱ تن انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود، در حالی که افزایش مربوط به انتشار دی‌اکسید کربن، به دلیل افزایش یک تری‌ژول در تقاضای نهایی گاز تصفیه‌شده برابر با ۷۳ تن است؛ این مقدار انتشار یک‌سوم مقدار انتشار در برق است. یافته‌ها در جدول (۱) نشان می‌دهد، در میان محصولات انرژی از لحاظ میزان افزایش انتشار، گاز تصفیه‌شده کم‌ترین مقدار را دارد.

جدول ۱: ضرایب داده-ستانده انرژی چندعاملی برای محصولات انرژی[1]

نام محصول	مصرف انرژی اولیه (تری‌ژول)	مصرف انرژی تجدیدپذیر (تری‌ژول)	تولید انرژی اولیه (تری‌ژول)	انتشار CO_2 (تن)	کارایی (درصد)
برق	۴/۱۰۴	۰/۰۵۸۸	۳/۹۲۳	۲۲۱	۲۴
بنزین	۲/۰۳۲	۰/۰۰۰۲	۲/۰۲۷	۱۳۹	۴۹
کک	۱/۸۸۷	۰/۰۰۰۲	۱/۸۸۳	۱۳۰	۵۳
گازوییل	۱/۸۶۵	۰/۰۰۰۲	۱/۸۶۰	۱۲۸	۵۴
نفت کوره	۱/۸۶۵	۰/۰۰۰۲	۱/۸۶۰	۱۲۸	۵۴
نفت سفید	۱/۸۶۵	۰/۰۰۰۲	۱/۸۶۰	۱۲۸	۵۴
قطران زغال سنگ	۱/۸۶۵	۰/۰۰۰۲	۱/۸۶۰	۱۲۸	۵۴
نفتا	۱/۸۶۵	۰/۰۰۰۲	۱/۸۶۰	۱۲۸	۵۴
گاز مایع	۱/۳۹۹	۰/۰۰۰۰۹	۱/۳۹۰	۹۵	۷۲
گاز تصفیه‌شده	۱/۴۴۴	۰/۰۰۰۰۸	۱/۴۴۲	۷۳	۶۹
سوخت زیستی جامد	۱/۰۰۵	۱/۰۰۵	۱/۰۰۵	۱۰۱	۹۹

۱. برابر شدن رقم برآورد در برخی از محصولات انرژی به دلیل گرد کردن ارقام است. برای مثال، مصرف انرژی اولیه برای محصول گازوییل ۱/۸۶۴۸۲۹۵۵۸ تری‌ژول، برای نفت سفید ۱/۸۶۴۶۸۹۳۵۱ تری‌ژول و برای نفتا ۱/۸۶۴۵۴۹۱۴۴ تری‌ژول است که با گرد کردن تا سه رقم اعشار، ارقام برآوردی در جدول به صورت یکسان نشان داده شده است.

کارایی تبدیل محصولات انرژی

ماتریس معکوس لئونتیف انرژی $\ddot{\mathbf{L}}^E$ در رابطه (۱۵) عملکرد تولید انرژی را توصیف می‌کند که شامل حامل‌های اولیه و ثانویه در بخش انرژی است. با پیش‌ضرب ماتریس قطری ضرایب انرژی اولیه ($\widehat{k_p}$) در ماتریس معکوس لئونتیف انرژی ($\ddot{\mathbf{L}}^E$) کل نیازها به انرژی اولیه برای تولید هر واحد انرژی به‌ازای هر واحد تقاضای نهایی محاسبه شده است. در این راستا، معکوس مجموع ستون ماتریس ($\widehat{kp} \times \ddot{\mathbf{L}}^E$) کارایی تبدیل انرژی اولیه به ثانویه را مشخص می‌کند. یافته‌ها در جدول (۱) نشان می‌دهد، کم‌ترین کارایی تبدیل انرژی اولیه به انرژی ثانویه مربوط به برق است که تنها ۲۴ درصد انرژی اولیه به انرژی ثانویه تبدیل می‌شود. نفت سفید، گازوییل و نفت کوره، کک و نفتا کارایی بالای ۵۰ درصد دارند. گاز مایع نیز با کارایی ۷۲ درصدی بعد از سوخت‌های زیستی جامد، بیش‌ترین کارایی تبدیل انرژی اولیه به ثانویه را داراست.

تحلیل ضرایب محصولات غیرانرژی

نتایج حاصل از جدول (۲) حاکی از آن است که از منظر مصرف انرژی اولیه، محصولات کانی غیرفلزی رتبه اول را دارند؛ به‌طوری که یک میلیارد ریال افزایش در تقاضای نهایی برای محصولات کانی غیرفلزی سبب افزایش ۲/۵۷۳ تری‌ژول مصرف انرژی اولیه می‌شود. خدمات حمل‌ونقل ریلی، دریایی و هوایی با ضریب ۱/۹۸۰ رتبه بعدی را از لحاظ مصرف انرژی اولیه به خود اختصاص داده‌اند. کم‌ترین ضریب مصرف انرژی اولیه مربوط به خدمات بهداشتی و خدمات واسطه‌گری مالی است. افزایش یک میلیارد ریالی در تقاضای نهایی برای این محصولات، مصرف انرژی اولیه را به مقدار ۰/۲۴۶ تری‌ژول افزایش می‌دهد.

با توجه به یافته‌های این پژوهش، اگرچه رابطه مستقیم بین ضریب مصرف انرژی اولیه و میزان انتشار دی‌اکسید کربن وجود دارد، در برخی از محصولات این موضوع نقض می‌شود. برای مثال، در بخش‌های مربوط به تولید نخ و محصولات نساجی با وجود ضریب انرژی اولیه بالاتر نسبت به مواد غذایی و آشامیدنی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن کم‌تر است. دلیل این امر می‌تواند نوع سوخت مصرفی در این محصولات باشد. از لحاظ مصرف انرژی تجدیدپذیر، بیش‌ترین پتانسیل مصرف انرژی تجدیدپذیر مربوط به محصولات کانی غیرفلزی است، به‌طوری که یک میلیارد ریال افزایش در تقاضای نهایی برای محصولات کانی غیرفلزی، ۰/۰۰۷۱ تری‌ژول افزایش در مصرف انرژی تجدیدپذیر در این محصول صورت می‌پذیرد. یافته‌های این پژوهش در جدول (۲) نشان می‌دهد، سهم انرژی تجدیدپذیر از مصرف انرژی اولیه در میان محصولات مختلف کم‌تر از ۲ درصد است. این نتیجه برای محصولات با مصرف انرژی اولیه بالاتر بیش‌تر نمایان است.

جدول ۲: ضرایب داده-ستانده انرژی چندعاملی برای محصولات غیرانرژی

محصول	مصرف انرژی اولیه (تری‌ژول)	مصرف انرژی تجدیدپذیر (تری‌ژول)	تولید انرژی اولیه (تری‌ژول)	انتشار دی‌اکسید کربن (تن)	تولید کل (میلیارد ریال)	شدت آلایندگی (تن/ میلیارد ریال)
محصولات کانی غیرفلزی	۲/۵۷۳	۰/۰۰۷۱	۲/۵۴۸	۱۴۲	۱/۸۴۸	۷۷
خدمات حمل‌ونقل ریلی	۱/۹۸۰	۰/۰۰۰۷	۱/۹۷۴	۱۳۱	۱/۵۵۲	۸۴
خدمات حمل‌ونقل دریایی	۱/۹۸۰	۰/۰۰۰۷	۱/۹۷۴	۱۳۱	۱/۵۵۲	۸۴
خدمات حمل‌ونقل هوایی و فضایی	۱/۹۸۰	۰/۰۰۰۷	۱/۹۷۴	۱۳۱	۱/۵۵۲	۸۴
خدمات حمل‌ونقل جاده‌ای	۱/۹۶۹	۰/۰۰۰۸	۱/۹۶۳	۱۳۰	۱/۵۵۱	۸۴
خدمات پشتیبانی حمل‌ونقل	۱/۹۶۲	۰/۰۰۰۸	۱/۹۵۶	۱۲۹	۱/۵۵۱	۸۳
خدمات انتقال از طریق خط لوله	۱/۸۲۵	۰/۰۰۰۷	۱/۸۱۹	۱۲۰	۱/۵۳۵	۷۸
محصولات از لاستیک و پلاستیک	۱/۱۸۳	۰/۰۰۳۶	۱/۱۷۱	۷۰	۲/۵۴۶	۲۸
محصولات معدنی	۱/۰۱۴	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹۹	۶۰	۱/۴۹۱	۴۰
ساختمان	۰/۹۷۲	۰/۰۰۲۶	۰/۹۶۳	۵۷	۲/۳۲۸	۲۵
محصولات شیمیایی اساسی	۰/۹۷۶	۰/۰۰۳۲	۰/۹۶۵	۵۲	۱/۹۷۸	۲۶
فلزات اساسی	۰/۹۰۴	۰/۰۰۱۶	۰/۸۹۹	۵۲	۲/۲۱۳	۲۴
انواع ماشین‌آلات کشاورزی، ماشین‌ابزار، متالژی (ذوب فلز) و معدن‌کاری و قطعات آن‌ها	۰/۸۲۵	۰/۰۰۲۱	۰/۸۱۸	۴۸	۲/۱۱۶	۲۳
انواع نخ و محصولات نساجی	۰/۶۹۲	۰/۰۰۳۷	۰/۶۸۱	۳۸	۲/۰۲۰	۱۹
مواد غذایی و آشامیدنی‌ها	۰/۶۸۸	۰/۰۰۳۴	۰/۶۷۸	۴۰	۲/۲۸۵	۱۷
محصولات زراعی و باغی	۰/۶۰۵	۰/۰۰۴۲	۰/۵۹۲	۳۵	۱/۶۸۱	۲۱
محصولات دامی	۰/۶۰۵	۰/۰۰۴۲	۰/۵۹۲	۳۵	۱/۶۸۱	۲۱
محصولات جنگلداری	۰/۶۰۵	۰/۰۰۴۲	۰/۵۹۲	۳۵	۱/۶۸۱	۲۱
ماهی و محصولات ماهیگیری	۰/۶۰۵	۰/۰۰۴۲	۰/۵۹۲	۳۵	۱/۶۸۱	۲۱
انواع کاغذ و محصولات کاغذی، محصولات چاپی و اقلام مربوطه	۰/۵۷۸	۰/۰۰۲۳	۰/۵۷۱	۳۳	۲/۰۱۳	۱۷
سایر ماشین‌آلات و تجهیزات	۰/۵۳۱	۰/۰۰۱۵	۰/۵۲۷	۳۲	۲/۳۹۶	۱۳
انواع مبلمان سایر مصنوعات	۰/۴۷۳	۰/۰۰۱۶	۰/۴۶۹	۲۸	۱/۹۳۱	۱۵

ادامه جدول ۲: ضرایب داده-ستانده انرژی چندعاملی برای محصولات غیرانرژی

محصول	مصرف انرژی اولیه (تری‌ژول)	مصرف انرژی تجدیدپذیر (تری‌ژول)	تولید انرژی اولیه (تری‌ژول)	انتشار دی‌اکسید کربن (تن)	تولید کل (میلیارد ریال)	شدت آلایندگی (تن/ میلیارد ریال)
انواع سیگار و سایر محصولات از توتون و تنباکو	۰/۴۲۰	۰/۰۰۱۶	۰/۴۱۶	۲۴	۱/۷۳۹	۱۴
آب	۰/۳۸۱	۰/۰۰۲۷	۰/۳۷۶	۲۱	۱/۴۸۵	۱۴
خدمات هتل و رستوران	۰/۳۵۳	۰/۰۰۲۷	۰/۳۴۸	۲۰	۱/۴۶۶	۱۴
خدمات کسب‌وکار	۰/۳۲۵	۰/۰۰۲۶	۰/۳۲۱	۱۹	۱/۴۴۰	۱۳
چرم و محصولات چرمی	۰/۲۷۶	۰/۰۰۱۱	۰/۲۷۳	۱۶	۱/۷۵۳	۹
خدمات اداری و عمومی	۰/۲۷۳	۰/۰۰۲۵	۰/۲۶۹	۱۶	۱/۴۱۶	۱۱
خدمات مسکونی و اجاره‌ای	۰/۲۵۶	۰/۰۰۲۶	۰/۲۵۲	۱۵	۱/۳۷۴	۱۱
خدمات عمده‌فروشی و خرده‌فروشی و حق‌العمل‌کاری	۰/۲۵۵	۰/۰۰۲۶	۰/۲۵۱	۱۵	۱/۳۸۱	۱۱
سایر خدمات	۰/۲۴۹	۰/۰۰۲۶	۰/۲۴۵	۱۴	۱/۳۷۳	۱۰
خدمات پست و پیک	۰/۲۴۸	۰/۰۰۲۶	۰/۲۴۴	۱۴	۱/۳۷۲	۱۰
خدمات آموزشی	۰/۲۴۷	۰/۰۰۲۶	۰/۲۴۳	۱۴	۱/۳۷۲	۱۰
خدمات واسطه‌گری مالی	۰/۲۴۶	۰/۰۰۲۶	۰/۲۴۲	۱۴	۱/۳۷۲	۱۰
خدمات بهداشتی	۰/۲۴۶	۰/۰۰۲۶	۰/۲۴۲	۱۴	۱/۳۷۲	۱۰

با توجه به انرژی اولیه داخلی و انرژی اولیه وارداتی، یافته‌ها در جدول (۲) نشان می‌دهد یک میلیارد ریال افزایش تقاضای نهایی برای محصولات کانی غیرفلزی سبب ۲/۵۴۸ تری‌ژول افزایش تولید انرژی اولیه می‌شود. به عبارتی، سهم افزایش انرژی اولیه داخلی در تامین انرژی اولیه مورد نیاز ۲/۵۴۸ تری‌ژول است. همچنین، خدمات بهداشتی و خدمات واسطه‌گری مالی کم‌ترین ضریب تولید انرژی اولیه را دارند، به‌طوری که یک میلیارد ریال افزایش در تقاضای نهایی سبب ۰/۲۴۲ تری‌ژول افزایش در تولید انرژی اولیه می‌شود. میزان افزایش انرژی اولیه وارداتی مورد استفاده در این محصولات ۰/۰۰۴ است. دلیل اندک بودن سهم واردات انرژی اولیه در تولید انرژی، صدور انرژی اولیه توسط ایران است.

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شد، با افزایش یک میلیارد ریال تقاضای نهایی برای محصولات لاستیک و پلاستیک، تولید کل ۲/۵۴۶ میلیارد ریال افزایش می‌یابد. این محصولات بیش‌ترین پتانسیل رشد تولید را به خود اختصاص داده‌اند. مواد غذایی و آشامیدنی‌ها، ساختمان و سایر ماشین‌آلات و تجهیزات رتبه‌های بعدی از لحاظ پتانسیل رشد تولید را دارند. با توجه به مغایرت اهداف زیست‌محیطی و توسعه اقتصادی در بیش‌تر موارد، دغدغه اصلی سیاستگذار یافتن راهکارهایی خواهد بود که قادر به تحقق توأم اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی باشد. بنابراین، میزان انتشار به‌ازای هر واحد رشد تولید در بخش‌های مختلف غیرانرژی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌ها در جدول (۲) نشان می‌دهد، بخش مربوط به خدمات حمل‌ونقل بیش‌ترین مقدار انتشار دی‌اکسید کربن را به‌ازای هر واحد رشد تولید (شدت آلایندگی) دارد. محصولات کانی غیرفلزی در رتبه بعدی قرار دارند. چرم و محصولات چرمی، خدمات بهداشتی، خدمات واسطه‌گری مالی، خدمات آموزشی، خدمات پست و پیک و سایر خدمات به‌ترتیب کم‌ترین مقدار انتشار دی‌اکسید کربن را به‌ازای هر واحد رشد تولید دارا هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی میزان انتشار دی‌اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصادی در کشور ایران پرداخته است. برای این منظور با محاسبه ضرایب مصرف انرژی اولیه، مصرف انرژی تجدیدپذیر، تولید انرژی اولیه، تولید کل، انتشار CO_2 از مصرف انرژی اولیه، و میزان انتشار دی‌اکسید کربن به‌ازای هر واحد رشد تولید در بخش‌های مختلف تعیین شده است.

در این پژوهش از روش داده-ستانده انرژی چندعاملی استفاده شده است که برای اولین بار در ایران به‌کار می‌رود. این روش می‌تواند جریان‌های انرژی غیربازاری را که با استفاده از اطلاعات مالی در جدول داده ـ ستانده متعارف وجود ندارد، حساب کند. علاوه بر آن، با اصل صرفه‌جویی انرژی مطابقت دارد و نمایش دقیق‌تر و مفصل‌تری از جریان انرژی ارائه می‌دهد. همچنین، با تفکیک انرژی اولیه از حامل‌های انرژی ثانویه، از شمارش مضاعف گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌کند. سهم دیگر این پژوهش، محاسبه کارایی تبدیل انرژی اولیه به ثانویه در حامل‌های مختلف انرژی برای مشخص شدن میزان تلفات تبدیل انرژی است. بررسی ضریب مصرف انرژی تجدیدپذیر در این پژوهش نیز ما را قادر می‌سازد که سهم انرژی پاک را در تامین انرژی اولیه و همچنین در مصرف محصولات مختلف مشخص کنیم.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در میان محصولات انرژی، برق دارای بالاترین ضریب مصرف انرژی اولیه است. اگرچه ضریب مصرف انرژی تجدیدپذیرِ این محصول نسبت به دیگر محصولات انرژی بالاتر است، به دلیل اندک بودن سهم مصرف انرژی تجدیدپذیر از مصرف انرژی اولیه، برق بالاترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص داده است. همچنین، کارایی تبدیل انرژی اولیه به ثانویه برق ۲۴ درصد است که پایین‌ترین کارایی را در محصولات انرژی دارد. به عبارت دیگر، مقدار زیادی از انرژی اولیه در فرایند تبدیل به صورت گرما تلف می‌شود.

در میان محصولات غیرانرژی، محصولات کانی غیرفلزی و خدمات حمل‌ونقل بیش‌ترین ضریب مصرف انرژی اولیه و انتشار دی‌اکسید کربن را دارند. میزان انتشار به‌ازای هر واحد رشد تولید بخش‌های مربوط به محصولات غیرانرژی نشان می‌دهد که بخش تولید چرم و محصولات چرمی، کم‌ترین مقدار انتشار دی‌اکسید کربن را به‌ازای هر واحد رشد تولید داشته است. پس دولت می‌تواند با در نظر گرفتن تخفیف‌های مالیاتی و یارانه، توسعه فعالیت‌های اقتصادی را در این بخش‌ها مورد حمایت قرار دهد. خدمات حمل‌ونقل بیش‌ترین انتشار را به‌ازای هر واحد رشد تولید دارد. به این ترتیب، در حالی که رشد و توسعه وابستگی زیادی به گسترش امکانات حمل‌ونقل دارد، گسترش این بخش باید با برنامه‌ریزی صورت گیرد. گسترش استفاده از خدمات تجارت الکترونیک، بهبود کیفیت انرژی‌های مورد استفاده در بخش حمل‌ونقل و الزام خودروسازها در جهت کاهش مصرف انرژی خودروهای تولیدی می‌تواند از گسترش عوارض جانبی ناشی از گسترش فعالیت‌های حمل‌ونقل بکاهد.

همان‌طور که یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد، سهم انرژی تجدیدپذیر در تامین انرژی اولیه در ایران بسیار اندک است. بر اساس این، پیشنهاد می‌شود منابع مالی مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری‌ها در زمینهٔ توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر فراهم شود. این منابع می‌تواند از طریق درآمد حاصل از حذف یارانه انرژی فسیلی تامین گردد.

اظهاریه قدردانی

نویسندگان این پژوهش از پیشنهادها و توصیه‌های شایسته داوران محترم و ناشناس که در بهبود کیفی مقاله نقش مهمی داشته‌اند و نیز از ویراستار علمی نشریه (مازیار چابک) کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

الف) انگلیسی

Ayres, R. U., & Nair, I. (1984). Thermodynamics and Economics. *Physics Today, 37*(11), 62-71. https://doi.org/10.1063/1.2915973

Bagheri, M., Guevara, Z., Alikarami, M., Kennedy, C. A., & Doluweera, G. (2018). Green Growth Planning: A Multi-Factor Energy Input-Output Analysis of the Canadian Economy. *Energy Economics, 74*(1), 708-720. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.015

Balali, H., Zamani-Dadandeh, O., & Yousofi, A. (2013). The Relationship between Economic Growth and Environmental Pollution in Oil Sector with Emphasis on Oil Price Volatility: Case Study of Iran. *Planning and Budgeting, 18*(3), 49-66. [In Farsi] http://jpbud.ir/article-1-1070-fa.html

Banouei, A. A., & Kamal, E. (2014). Measurement of Direct and Indirect Co2 Contents of Exports and Imports of Iran: Using Input-Output Approach. *Iranian Economic Development Analyses, 2*(2), 41-70. [In Farsi] https://ieda.alzahra.ac.ir/article_1902.html?lang=en

Berndt, E. R. (1978). Aggregate Energy, Efficiency, and Productivity Measurement. Annual Review of Energy, 3(1), 225-273. https://doi.org/10.1146/annurev.eg.03.110178.001301

Berndt, E. R., & Wood, D. O. (1975). Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy. *The Review of Economics and Statistics, 57*(3), 259-268. https://doi.org/10.2307/1923910

Bhattacharyya, S. C. (2019). *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance:* Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7468-4

Chontanawat, J., Hunt, L. C., & Pierse, R. (2006). *Causality between Energy Consumption and GDP: Evidence from 30 OECD and 78 Non-OECD Countries*. Surrey Energy Economics Centre (SEEC), School of Economics Discussion Papers (SEEDS) 113, Surrey Energy Economics Centre (SEEC), School of Economics, University of Surrey.

Darvishi, B., moridian, a., Motalebi, M., & havasbeigi, f. (2021). Globalization, Energy Consumption and Environmental Degradation in Iran: Empirical Evidence from the Maki Cointegration Test. *The Economic Research (Sustainable Growth and Development), 21*(2), 59-82. [In Farsi] http://ecor.modares.ac.ir/article-18-45395-fa.html

Denison, E. F. (1979). Accounting for Slower Economic Growth. *The Brookings Institution.*

Environmental Performance Index (EPI) (2022). EPI Results. https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/epi

Eslami Giski, S., Salimifar, M., & Esifi, A. (2022). The Effect of Industrial Agglomeration on Pollution Agglomeration: Spatial Econometric Approach. *Planning and Budgeting, 27*(1), 155-176. [In Farsi] http://jpbud.ir/article-1-2077-fa.html

Guevara, Z., & Domingos, T. (2017). The Multi-Factor Energy Input–Output Model. *Energy Economics, 61*(1), 261-269. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.11.020

Guo, J., Zhang, Y.-J., & Zhang, K.-B. (2018). The Key Sectors for Energy Conservation and Carbon Emissions Reduction in China: Evidence from the Input-Output Method. *Journal of Cleaner Production, 179*(1), 180-190. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.080

Jafari Samimi, A., & Najari, F. (2019). Evaluating the Contribution of Factors Affecting on Pollution Changes in Iran's Industrial Sector: Structural Decomposition Approach in the

Input-Output Method. *Journal of Environmental Science Studies, 4*(1), 1055-1064. [In Farsi] http://www.jess.ir/article_87049.html?lang=en
Kunanuntakij, K., Varabuntoonvit, V., Vorayos, N., Panjapornpon, C., & Mungcharoen, T. (2017). Thailand Green GDP Assessment Based on Environmentally Extended Input-Output Model. *Journal of Cleaner Production, 167*(1), 970-977. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.106
Liu, L., Huang, G., Baetz, B., & Zhang, K. (2018). Environmentally-Extended Input-Output Simulation for Analyzing Production-Based and Consumption-Based Industrial Greenhouse Gas Mitigation Policies. *Applied Energy, 232*(1), 69-78. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.192
Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions:* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511626982
Nasrolahi, Z., Ahmadi, Z., & Eshrati, S. (2011). Environmental Impact Assessment of Economic Activity in Iran: An Input-output Approach. *Economic Modelling, 6*(17), 45-64. https://eco.firuzkuh.iau.ir/article_555475.html
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2017). *Global Climate Report - Annual 2016.* NOAA National Centers for Environmental Information. https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201613 .
Qayyum, M., Yu, Y., Nizamani, M. M., Raza, S., Ali, M., & Li, S. (2022). Financial Instability and CO2 Emissions in India: Evidence from ARDL Bound Testing Approach. *Energy & Environment,* 0958305X211065019. https://doi.org/10.1177/0958305X211065019
Radwan, A., Hongyun, H., Achraf, A., & Mustafa, A. M. (2022). Energy Use and Energy-Related Carbon Dioxide Emissions Drivers in Egypt's Economy: Focus on the Agricultural Sector with a Structural Decomposition Analysis. *Energy, 258*(1), 124821. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124821
Ramos, C., García, A. S., Moreno, B., & Díaz, G. (2019). Small-Scale Renewable Power Technologies are an Alternative to Reach a Sustainable Economic Growth: Evidence from Spain. *Energy, 167*(1), 13-25. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.118
Sabour, S. A. A. (2005). Quantifying the External Cost of Oil Consumption within the Context of Sustainable Development. *Energy Policy, 33*(6), 809-813. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.006
Sadeghi, Z., Horry, H., & Sadeghi Nasaj, S. S. (2021). Technical and Economical Comparison of Supplying Energy from Combined Solar-Wind Power Plants in Lieu of Natural Gas Transmission Lines. *Planning and Budgeting, 26*(2), 77-109. [In Farsi] http://jpbud.ir/article-1-1935-fa.html
Shim, J. H. (2006). The Reform of Energy Subsidies for the Enhancement of Marine Sustainability. *Case Study of South Korea, University of Delaware.*
Shirmohammadi, R., Soltanieh, M., & Romeo, L. M. (2018). Thermoeconomic Analysis and Optimization of Post-Combustion CO2 Recovery Unit Utilizing Absorption Refrigeration System *for a Natural-Gas-Fired Power Plant. Environmental Progress & Sustainable Energy, 37*(3), 1075-1084. https://doi.org/10.1002/ep.12866
Stern, D. I. (1998). Progress on the Environmental Kuznets Curve? *Environment and Development Economics, 3*(2), 173-196. https://doi.org/10.1017/S1355770X98000102
Stern, D. I. (2004). Economic Growth and Energy. *Encyclopedia of Energy, 2*(00147), 35-

51. https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00147-9
Torabi, T., & Varesi, M. (2009). Studying the Environmental Pollution of Industries in Iran Using an Input-Output Approach (Special Case: CO2). *Journal of Environmental Science and Technology, 11*(3), 77-92. [In Farsi] https://jest.srbiau.ac.ir/article_177.html?lang=en
Uz Zaman, Q., Wang, Z., Zaman, S., & Rasool, S. F. (2021). Investigating the Nexus between Education Expenditure, Female Employers, Renewable Energy Consumption and CO2 Emission: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production, 312*(1), 127824. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127824
World Bank (2019). Energy Use (kg of Oil Equivalent Per Capita). The World Bank Group.
Xia, Y., Fan, Y., & Yang, C. (2015). Assessing the Impact of Foreign Content in China's Exports on the Carbon Outsourcing Hypothesis. *Applied Energy, 150*(1), 296-307. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.028

ب) فارسی

صادقی، نرگس (۱۳۹۵). *سنجش مصرف انرژی و انتشار آلایندگی CO2 در بخش‌های اقتصادی*. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۵۲۴۴.
مدیریت تامین و توزیع شرکت ملّی پخش فرآورده‌های نفتی ایران (۱۳۹۷). *آمارنامه مصرف فرآورده‌های نفتی انرژی‌زا- ۱۳۹۷*. انتشارات روابط عمومی شرکت ملّی پخش فرآورده‌های نفتی ایران. https://niordc.ir/index.aspx?fkeyid=&siteid=78&pageid=3060

نحوه ارجاع به مقاله:

جعفری تراجی، مریم؛ مداح، مجید، و شریفی، نورالدین (۱۴۰۱). تعیین میزان انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف انرژی اولیه در بخش‌های مختلف تولیدی در ایران: تحلیل داده ـ ستانده انرژی چندعاملی. *نشریه برنامه‌ریزی و بودجه*، ۲۷(۴)، ۱۷۶-۱۵۳.

Jafari Taraji, M., Maddah, M., & Sharify, N. (2022). Determining the Amount of Carbon Dioxide Emission from Primary Energy Consumption in Different Production Sectors of Iran: A Multi-Factor Energy Input-Output Analysis. *Planning and Budgeting*, *27*(4). 153-176.
DOI: https://doi.org/10.52547/jpbud.27.4.153

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Planning and Budgeting. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://Creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.