



ردپای کربن و روش‌های محاسبه آن با تاکید بر تولید برق از منابع فسیلی و تجدیدپذیر

مهناز ابوالقاسمی^۱، حسین یوسفی^{۲*}، سیّده مهسا موسوی رینه^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

* صندوق پستی تهران، ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، Hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

شواهد بسیاری مبنی بر تغییرات اقلیم نشان می‌دهد که بشریت می‌بایست نگران آینده باشد. غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر در بالاترین حد خود در ششصد و پنجاه هزار سال گذشته می‌باشد و به صورت جدی نیز در حال افزایش است. در نتیجه‌ی افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، خشکسالی، قحطی، افزایش سطح آب اقیانوس‌ها تنها بخشی از تبعات قابل پیش‌بینی این موضوع می‌باشند. بخش انرژی سهم بسزایی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. به گزارش کنوانسیون تغییر اقلیم، رتبه ایران در سال ۲۰۱۷ از نظر تولید گاز دی‌اکسید کربن هفتم دنیا بوده است. مطابق توافق‌نامه پاریس برای محدود کردن افزایش درجه حرارت زمین به دو درجه سلسیوس، انتشار ناشی از بخش انرژی باید تا ۴۰ درصد کاهش پیدا کند. با توجه به این موضوع که سوخت‌های فسیلی در مرتبه اول تولید انرژی هستند، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهت کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن و همچنین کمی کردن میزان انتشار با استفاده از ابزارهای مانند ردپای کربن می‌تواند به کاهش اثرات تغییر اقلیم کمک کند. با محاسبه ردپای کربن ذخیره شده در صورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی و منظور کردن منافع زیست محیطی و در نتیجه هزینه‌های کمتری که این نوع انرژی به محیط زیست تحمیل می‌کند میتوان اثرات مفید استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را به صورت ملموس تری نمایش داد. این مقاله مروری بر تاریخچه و روش‌های محاسبه ردپای کربن و همچنین بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی میزان انتشار کربن دی‌اکسید در تولید برق از سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. تحلیل ردپای کربن می‌تواند به فهم و آگاهی افراد از آثار فعالیت انسان‌ها و سازمان‌ها بر محیط زیست کمک کند و برای کاهش انتشار کربن و تغییرات آب و هوایی کشورها منابع علمی ارائه دهد.

کلیدواژگان: ردپای کربن، تولید برق، انرژی تجدیدپذیر، سوخت فسیلی



Carbon footprint and its calculation methods with emphasis on electricity generation from renewable and fossil sources.

Mahnaz Abolghasemi¹, Hossein Yousefi^{2*}, Mahsa Mousavi Reineh¹

1- Master of Science (MSc) Student, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, Hosseinyousefi@ut.ac.ir

Received: 12 November 2018 Accepted: 1 January 2019

Abstract

Many evidences of climate changes suggest that humanity must be concerned about the future. The concentration of carbon dioxide in the atmosphere is at its highest in the past six hundred and fifty thousand years, and is rising steadily. Following an increase in emissions of greenhouse gases, drought, famine, an increase in ocean water levels is only part of the predictable consequences of this issue. The energy sector has a significant share in greenhouse gas emissions. According to the Climate Change Convention, Iran ranked the world's seventh largest carbon dioxide producer in 2017. According to the Paris Summit, to limit the increase in ground temperature to two degrees Celsius, emissions from the energy sector should be reduced to 40%. Given that fossil fuels are a major source of energy production, the use of renewable energies to reduce carbon dioxide emissions and measure emissions through carbon footprint can help reduce the effects of climate change. By calculating the carbon footprint stored when using renewable energies instead of fossil fuels and taking into account the environmental benefits and hence the lower costs that this type of energy imposes on the environment It is possible to understand the beneficial effects of using renewable energies in a more intelligible way. This paper reviews the history and methods of calculating the carbon footprint, as well as studies on the calculation of carbon dioxide emissions in the production of electricity from fossil fuels and renewable energy. Carbon footprint analysis can help person understand the effects of human activity and organizations on the environment and provide scientific resources to reduce carbon emissions and climate change in countries.

Keywords: Carbon Footprint, Power Generation, Renewable Energy, Fossil Fuel



۱- مقدمه

انسان‌ها برای تامین نیاز خود ناگزیر از تقاضا برای کالا و خدمات هستند، همین تقاضای آن‌ها می‌تواند محرک فرایند تولیدی باشد که منابع طبیعی (منابع انرژی) را مصرف می‌کند و انتشار آلایندهایی از جمله CO₂ را به همراه دارد [۱،۲]. براساس گزارش سال ۲۰۱۳ آژانس بین‌المللی انرژی، انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به طور مستقیم با مصرف انرژی مرتبط است و همبستگی شدیدی بین مصرف انرژی‌های فسیلی و انتشار CO₂ وجود دارد به گونه‌ای که طبق آمار مرکز تجزیه و تحلیل اطلاعات دی‌اکسیدکربن (CDIAC) از سال ۱۸۷۰ تا ۲۰۱۰ میزان انتشار این گاز ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی به صورت نمایی در جهان افزایش یافته است. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و لزوم اتخاذ سیاست‌های مناسب جهت کاهش آن در کشورهای در حال توسعه، توجه اکثر کشورها را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. با اهمیت یافتن مسائل زیست محیطی در سطح بین‌المللی، اکثر کشورها سعی در پیاده‌سازی سیاست‌هایی در مورد کاهش میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن کردند. انتشار بیشتر گازهای گلخانه‌ای در ایران نیز شرایط زندگی را برای انسان‌ها و جانداران بیش از پیش با مشکل مواجه می‌نماید و بیش از پیش نیازمند کنترل آنها و رعایت استانداردها در این زمینه می‌باشد. بدین منظور ابتدا باید جریان انتشار این آلاینده مشخص شود و سپس با اتخاذ سیاست‌های مناسب برای کنترل و کاهش آن‌ها تلاش نمود. یکی از راه‌های برآورد میزان CO₂ منتشر شده در جهت تامین تقاضا در قالب ردپای کربن بیان می‌شود، که می‌تواند ابزاری مناسب برای سنجش کل فشار واردشده بر محیط زیست از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد. تحلیل ردپای کربن می‌تواند به فهم و آگاهی افراد از آثار فعالیت انسان‌ها و سازمان‌ها بر محیط زیست کمک کند و برای کاهش انتشار کربن و تغییرات آب و هوایی کشورها منابع علمی ارائه دهد.

هدف از مقاله حاضر مروری بر تاریخچه و روش‌های محاسبه ردپای کربن و همچنین مرور و بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه انتشار دی‌اکسید کربن در تولید برق از سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.

۲- روش بررسی

تحقیق انجام شده، با تاکید بر مفاهیم نظری است که با روش کتابخانه‌ای از کتب، مقالات داخلی و خارجی و سایت‌ها جمع‌آوری شده است و به بررسی تاریخچه ردپای کربن و روش‌های محاسبه آن در ایران و جهان پرداخته و در ادامه به تشریح تحقیقات انجام شده در زمینه ردپای کربن در تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و فسیلی پرداخته شده است.

۳- تاریخچه ردپای کربن

به منظور بررسی توسعه پایدار، صاحب نظران عرصه محیط زیست درصدد برآمدند تا با یافتن واحد سنجش معنادار و با اتخاذ یک رویکرد بیوفیزیکی به بررسی اصل پایداری بپردازند. از این رو شاخص‌های متعددی پیشنهاد شد تا جنبه‌های زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی از توسعه پایدار را به تصویر بکشند. یکی از شاخص‌های ارزیابی توسعه پایدار که با کمی کردن فشار محیط زیستی حاصل شده در راستای تامین تقاضای داخلی می‌تواند تا حدودی یک ابزار مناسب در زمینه سیاست‌گذاری کشورها باشد، شاخص "ردپا" است [۳]

[۴]. منظور از ردپا، این است که برای تامین نیازهای درونی جامعه چه میزان (در واحد فیزیکی) از سرمایه طبیعی (محیط زیست) در مقیاس جهانی کاسته شده است [۵].

در اوایل دهه ۱۹۹۰ ویلیام ریس، رئیس دانشگاه بریتیش کلمبیا، مفهوم ردپای بوم شناختی (FF) را مطرح کرد. او و شاگردش ماتریس واکرناگل مقالات علمی فراوانی در این زمینه نوشته‌اند. ریس و واکرناگل تصریح کردند که FF، اندازه‌گیری میزان فشاری است که انسان بر طبیعت تحمیل می‌کند [۶]. اصطلاح ردپای کربن که طی چند سال اخیر رایج شده و با افزایش نگرانی‌های عمومی در خصوص تغییرات آب و هوایی، مفهوم آن توسعه یافته است، ریشه در واژه ردپای بوم‌شناختی مطرح شده توسط واکرناگل و ریس (۱۹۹۶) دارد. ردپای اکولوژیکی شامل ۶ ردپای: کشاورزی، ماهیگیری، ساختمان، مرتع، جنگل و کربن می‌باشد. ردپای کربن به عنوان یکی از ۶ زیر مجموعه ردپای اکولوژیکی توسط واکرناگل به وجود آمد و هدف او در ارائه ردپای بوم‌شناختی توسعه و آزمایش ابزاری بود که با آن بتوان اهمیت بحران‌های پایداری را به یک اقدام عمومی بدل کند.

علی‌رغم جدید بودن، ردپای کربن برای حدود نیم قرن تحت عبارت انتشار ناشی از مصرف کربن جاسازی شده وجود داشته است. در زمینه محیط زیستی، مفهوم ردپای کربن از حدود سال ۱۹۷۰ مطالعه می‌شده است. هم‌اکنون نیز تحت عنوانین کربن جاسازی شده، انتشار گازهای گلخانه‌ای حین فرایند تولید، شدت کربن محصولات^۴ و حسابداری کربن^۵ استفاده می‌شود. پس از COP₂ در پاریس که ردپای کربن مورد توجه بیشتری در محیط آکادمیک قرار گرفته است و در مقیاس‌های متفاوتی استفاده می‌شود در نتیجه عبارت‌های متعددی در پژوهش‌ها با مفهوم یکسان در حیطه‌های مختلف به ردپای کربن اطلاق می‌شود و این ابهام نیز وجود دارد که واقعا ردپای کربن به چه معناست [۷]. برخی تعاریف مختلف که برای ردپای کربن در منابع علمی ارائه شده، در زیر با هدف یافتن نقطه مشترک به توجه به سیر تاریخی آن‌ها جمع آوری شده است:

Hammond (۲۰۰۷):

وزن کربن انتشار یافته بر اساس کیلوگرم یا تن به ازای هر فرد یا فعالیت [۸].

Petroleum (۲۰۰۷): مقدار دی‌اکسید کربن منتشره از فعالیت‌های روزانه.

مانند شستن لباس یا استفاده از وسایل حمل و نقل [۹].

Eckel (۲۰۰۷):

میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به صورت مستقیم و غیرمستقیم ناشی از فعالیت

های کسب و کار [۱۰].

Ellis (۲۰۰۷):

اندازه‌گیری مقدار دی‌اکسید منتشر شده از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی به طور مثال در مورد یک بنگاه تولیدی، ردپای کربن مقدار دی‌اکسیدکربن منتشره به صورت مستقیم و غیر مستقیم ناشی از فعالیت‌های روزانه می‌باشد، همچنین ممکن است بازتاب انرژی‌های فسیلی در تولید یک محصول یا محصولات یک بازار را نشان دهد [۱۱].

^۴Product carbon intensity

^۵Carbon accounting

بیست و یکمین کنفرانس اعضای معاهدین به کنوانسیون تغییرات اقلیم سازمان ملل متحد

^۶Carbon Dioxide Information Analysis Center
Embedded carbon

^۷Manufacturing Process GHGs emission



Johnson (۲۰۰۹):

مجموعه ای از گازهای گلخانه‌ای و گاز انتشار یافته از یک کالا یا سرویس در سراسر طول عمر خود [۱۲].

Hertwich and Peters (۲۰۰۹):

مقیاسی برای اندازه‌گیری تاثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط زیست است؛ از لحاظ مقدار گازهای گلخانه‌ای تولید شده از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی به منظور تولید برق، گرمایش، حمل و نقل و غیره که به صورت وزن CO₂ تولیدی و با واحد تن بیان می‌شود [۲].

Mays et al (۲۰۰۹):

میزان انتشارات مستقیم و غیر مستقیم دی‌اکسید کربن را که توسط یک فعالیت ایجاد شده‌است در طی مراحل زندگی یک محصول مشخص می‌سازد [۱۳].

Williams et al (۲۰۱۲):

مقیاسی از مقدار کل خروجی دی‌اکسید کربن (CO₂) و متانول (CH₄) مربوط به یک جمعیت، سیستم یا فعالیت معین با در نظر گرفتن همه منابع، فرونشین‌ها، ذخیره‌شدن‌ها در محدوده زمانی و مکانی آن جمعیت، آن سیستم یا فعالیت [۱۴].

Alsaffar et al (۲۰۱۲):

اندازه‌گیری تاثیر فعالیت‌های انسانی در محیط زیست از نظر انتشار گازهای گلخانه‌ای همچون اندازه‌گیری میزان دی‌اکسید کربن است [۱۵].

Solis-Guzmán et al (۲۰۱۴):

یک روش برای برای شناسایی و اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای منحصر به فرد، اندازه‌گیری میزان انتشار این گازها در هر فعالیتی و در همه مراحل (تهیه مواد اولیه، تخصیص مواد برای هر محصول) می‌باشد. [۱۶]

ولایت زاده و همکاران (۲۰۱۶):

میزان CO₂ است که توسط بخش‌های اقتصادی و در راستای تامین تقاضای نهایی داخلی، در سطح جهان (خواه تولید داخلی باشد، خواه وارداتی) منتشر می‌شود [۱۷].

در سال ۲۰۰۹ اندروز در تحقیقات دسته‌بندی از تعاریف ارایه شده و تفاوت آن‌ها ارایه کرد و اذعان داشت که ردپای کربن تنها یک اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن خروجی نیست، بلکه بیشتر به عنوان پارامتری است که می‌توان با آن پایداری فرایندهای تولیدی را بررسی نمود [۱۸]. همچنین ادعا نمود محققان در این زمینه نگرانی‌های در خصوص لزوم و یا عدم لزوم تولید یک ابزار جدید، تعریف و نحوه محاسبه‌ی ردپای کربن شامل موارد زیر دارا می‌باشند:

۱. گستره انتشار
۲. مراحل چرخه عمر
۳. مرزهای سیستم
۴. پایان عمر
۵. ترسیب و ذخیره کربن
۶. تغییر کاربری زمین
۷. کالاها و فرایند واسطه

۸. واحد محاسبه ردپای کربن

تا سال ۲۰۱۸، ۷۶ محاسبه‌گر ردپای کربن وجود داشته که ۵۲ عدد از آن‌ها ردپای کربن شخص و خانه‌ها را تخمین می‌زدند، ۱۲ مورد از آنها ردپای صنایع فلزات و غذایی را محاسبه می‌کردند و ۱۰ عدد نیز ردپای شرکت‌ها را کمی می‌کردند.

از آنجایی که مسئله افزایش دمای کره زمین از اهمیت خاصی برخوردار شده است، برآورد ردپای کربن نیز به صورت مستقل ظاهر شده است [۱۹]، در نتیجه تعاریف متفاوت و شیوه‌های متعدد محاسبه ردپای کربن که استفاده از آن در ابعاد گسترده در رسانه و مجامع علمی رایج شده است که باعث به وجود آمدن مناقشات بسیاری در بین محققان شده است، چنین ابهامی را می‌توان به دلیل عدم وجود متدلوژی مناسبی برای محاسبه و تحلیل آن دانست. مطالعات زیادی نیز به وسیله شرکت‌ها و سازمان‌های خصوصی در این زمینه صورت گرفته است [۱۹، ۱۸]، که یکی از فراگیرترین تقسیم‌بندی‌ها، ردپای کربن بخش‌های تولیدی را به دو بخش مستقیم و غیرمستقیم به صورت زیر تقسیم کرده‌است:

انتشار "مستقیم" کربن ناشی از تولید کالاها و خدمات آن بخش تولیدی است در حالیکه ردپای "غیرمستقیم" مربوط به مصرف کالاها و خدمات واسطه‌ای است که خود کربن انتشار داده‌اند و بخش‌های تولیدی در فرایند تولید خود از آنها استفاده می‌نمایند. برای مثال در یک واحد صنعتی، انتشار گاز CO₂ در طول سوختن گازوئیل را می‌توان یک انتشار مستقیم دانست. از سوی دیگر، در صورتی که دستگاه‌های صنعتی انرژی خود را به صورت الکتریکی تامین کنند، هیچ انتشاری را مشاهده نخواهیم کرد ولی در طول تولید الکتریسته در یک کارخانه انرژی گرمایی، میزان خاصی از گازهای CO₂ را باید آزاد کرد. یک چنین انتشاراتی، انتشار غیرمستقیم یا انتشار ادغام یافته نام دارد. در بسیاری از موارد، بکارگیری تمامی انتشارات غیر مستقیم امری غیر ممکن یا بسیار سخت است؛ از این رو، بسیاری از مطالعات مرتبط با برآورد ردپای کربن، فقط انتشارات مستقیم را در مطالعات خود در نظر گرفته‌اند [۷].

۳-۱ محاسبه ردپای کربن

با بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه محاسبه ردپای کربن، روش‌های متعددی برای برآورد ردپای کربن همچون استفاده از ماشین حساب‌های آنلاین برای آنالیز چرخه عمر یا روش‌ها و ابزارهای داده-ستانده و ماتریس حسابداری اجتماعی پیشنهاد شده است.

ادبیات موجود نشان می‌دهد که پژوهشگران از دو روش در سنجش ردپای کربن که زیر مجموعه‌ی ردپای اکولوژیک است، استفاده می‌کنند. روش اول ماهیت کلان دارد و بر مبنای مصرف آشکار منابع مورد نظر بکار رفته در تولید کالاها و خدمات داخلی بعلاوه منابع بکار رفته در تولید کالاها و خدمات واردات منهای منابع بکار رفته در تولید کالاها و خدمات صادرات محاسبه می‌گردد که اولین بار توسط واکرناگل و ریس در سال ۱۹۹۶ مطرح شد [۵].

اما بکارگیری روش مذکور نمی‌تواند وضعیت ردپای اکولوژیک را در جهت مدیریت منابع در سطح بخش‌های مختلف اقتصادی آشکار نماید. برای برون رفت از این مسأله، طیف وسیعی از پژوهشگران مثل هابک [۲۱]، لنزن و

موری [۲۲]، فرنگ [۲۳]، بیکنل و گیلجوم [۶]، روش دومی را در قالب نظام حسابداری بخشی به شکل جدول داده-ستانده مبنای محاسبه این شاخص قرار داده‌اند. میتوان گفت تجزیه و تحلیل داده-ستانده یا ماتریس حسابداری اجتماعی زیست محیطی برای محاسبه رد پای کربن در سیستم‌های کلان یا بخشی است. در این زمینه ردپای کربن از بخش‌های صنعتی، کسب و کارهای فردی، گروه‌های تولیدی بزرگتر، خانوارها، دولت، سرانه شهروندان یا سرانه اعضای یک گروه اقتصادی-اجتماعی خاص بوسیله تجزیه و تحلیل داده-ستانده و ماتریس حسابداری اجتماعی میتواند انجام شود، اما این روش نمی‌تواند همه محصولات موجود در اقتصاد را به صورت جزئی مورد تحلیل ردپای کربنی قرار دهد چرا که این مورد با وجود تعداد محصولات زیاد در اقتصاد، امکانپذیر نیست. [۲۰، ۲۳]	ضریب انتشار کربن (TC/TJ)	کسری از کربن اکسید شده	نوع سوخت	چگالی ρ kg/m ³	لیتر به ازای هر تن	ضریب تبدیل (TJ) در هزار تن
نفت خام	۲۰	۰/۹	نفت	۸۴۳/۹	۱۱۸۵	۴۳/۳۸
گاز طبیعی مایع	۱۷/۲	۰/۹۸	گازادیزل	۴۷۰/۷	۱۳۵۰	۴۴۸۰
زغال سنگ	۲۵۸	۰/۹	بنزین	۳۶۶/۳	۲۷۳۰	۴۷/۴۹
گازوئیل	۱۸/۹	۰/۹۸	اتان	-	-	۴۴/۳۳
			روغن موتور			

جدول ۲ ضریب انتشار کربن انواع سوخت به همراه کسری از دی‌اکسید کربن و ضرایب تبدیل

صادقی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای تحت عنوان وضعیت ردپای کربن، متان و اکسید نیتروژن زیر بخش‌های کشاورزی در مقایسه با سایر بخش‌های اقتصادی ایران، از روش ماتریس حسابداری اجتماعی سال ۱۳۹۰ استفاده کردند و نتایج حاکی از این است که ردپای کربن در زیربخش‌های گندم و پرورش دام و طیور بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهد [۲۶]. حاجی نژاد و همکاران (۱۳۹۷) جهت بررسی ردپای کربن در تأمین آب شرب شهر سپیدان از معادلات زیر استفاده کردند [۲۷]:

$$V_{CO_2-COOL} = 2.09 \times 0.454 \quad (1) \text{ معادله (۱)}$$

$$V_{CO_2-oil} = 1.969 \times 0.454 \quad (2) \text{ معادله (۲)}$$

$$V_{CO_2-gass} = 1.321 \times 0.454 \quad (3) \text{ معادله (۳)}$$

که در این معادله‌ها V_{CO_2-COOL} ، V_{CO_2-oil} و V_{CO_2-gass} به ترتیب حجم دی‌اکسید کربن منتشر شده ناشی از مصرف سوخت‌های زغال سنگ، نفت و گاز به واحد کیلوگرم و e انرژی مصرفی به واحد کیلووات بر ساعت است. جوشنی و همکاران (۱۳۹۵) در مقاله‌ای به بررسی ردپای کربن و عوامل موثر بر آن در کارخانه سیمان آبییک پرداختند. در این پژوهش ردپای کربن توسط دستگاه Testo350XL و همچنین براساس معادلات IPCC میزان انتشار تئوریک کارخانه محاسبه شد، که معادلات آن در زیر آورده شده است. در این پژوهش ابتدا به کمک معادله (۴) غلظت دی‌اکسید کربن اندازه‌گیری شده توسط دستگاه که به صورت حجم به حجم می‌باشد، به مقدار انتشار بر حسب kg/hr تبدیل شد.

$$MER = \frac{Q_N \cdot MW \cdot C10^{-6}}{V \cdot 1000} \quad (4) \text{ معادله (۴)}$$

در معادله (۴)، MER مقدار انتشار (بر حسب kg/hr)، MW وزن مولکولی آلاینده (gr/gr-mol)، C غلظت گاز آلاینده خروجی بر حسب (ppm) و

محققان بسیاری در زمینه محاسبه میزان انتشار دی‌اکسید کربن از نیروگاه‌ها مطالعه نموده‌اند. در ادامه به معرفی و بررسی روش‌های متداول محاسبه ردپای کربن در ایران و جهان می‌پردازیم.

تیموری و محمدی فر (۱۳۸۸) برای برآورد میزان انتشار کل گاز دی‌اکسید کربن از روش IPCC استفاده کردند که مراحل کار به صورت جدول ۱ می‌باشد [۲۵].

مرحله اول	میزان مصرف (F)
مرحله دوم	(G) تبدیل به واحد ترازول (واحد TJ) میزان مصرف بر اساس ترازول H
مرحله سوم	I ضریب انتشار کربن J محاسبه کربن ذخیره K حجم کربن (GgC)
مرحله چهارم	L کربن ذخیره شده (GgC) M ضریب انتشار خالص کربن (GgC)
مرحله پنجم	N کربن اکسید شده O انتشار واقعی کربن (GgC)
مرحله ششم	P میزان واقعی انتشار گاز CO (GgC) $P = (O * [44.12])$

جدول ۱ مراحل برآورد میزان انتشار گاز CO₂ با روش IPCC. ماخذ داده

ها International Energy Agency (IEA), ۲۰۰۸

بر اساس محاسبات بالا و به کمک جدول ۲ میزان دی‌اکسید کربن تولید شده برآورد می‌شود. جدول ۲ ضرایب انتشار گاز دی‌اکسید کربن و ضرایب تبدیل سوخت به ترازول را برای سوخت‌های فسیلی نشان می‌دهد.



مشخص کردن تعریفی واحد برای ردپای کربن روش محاسبه منطبق بر تعریف پیشنهادی را به صورت زیر شرح داد:

ردپای کربن براساس ۹ آیت شامل گستره انتشار، مراحل چرخه عمر، مرزهای سیستم، خنثی سازی انتشار، پایان عمر، ترسیب و ذخیره، تغییر کاربری زمین، کالاهای واسطه و بر اساس روش زیر که دارای مزایای تمامی روش‌ها و پوشاننده معایب آن‌ها می‌باشد، محاسبه می‌شود:

$$CF = \sum_{K=1}^L \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{e_{ijk}}{x_{ijk}} \quad (\text{معادله } ۸)$$

که در آن e انتشار ناشی از محصولات X می‌باشد. i نوع محصول، j نوع گاز گلخانه ای و k فازهای مختلف عمر در چرخه تولید می‌باشد. موارد زیر مثال‌هایی از بسط معادله (۸) می‌باشد. به عنوان مثال اگر تنها یک محصول تولید شده وجود داشته باشد و فقط دی اکسید کربن در سه فاز تولید، انتقال و مصرف نهایی در نظر گرفته شود، فرمول زیر بسط تک محصول در فازهای تولید و مصرف نهایی معادله (۹) می‌باشد.

$$CF_{Total} = CF_{Production} + CF_{Transmission} + CF_{Consumption} \quad (\text{معادله } ۹)$$

معادله (۱۰) ساده شده معادله (۹) برای تولید یک محصول در عمر مفید کارخانه تولیدی مانند نیروگاه می‌باشد که در n عمر بنگاه اقتصادی می‌باشد و می‌تواند از صفر تا زمان مرگ واحد تغییر کند و صفر نیز فاز ساخت را در بر می‌گیرد.

$$CF = CF_{Construction}(0) + \sum_{i=1}^{i=n} CF_{Operation} + \sum_{i=1}^{i=n} CF_{Maintenance} + CF_{Termination}(n)$$

معادله (۱۰)

با تغییر اندیس‌های مختلف در معادله (۱۰) می‌توان ردپای کربن محصولات مختلف را محاسبه نمود. می‌توان از فرمول بالا جهت مقیاس ملی و جهانی استفاده نمود و به جای X که محصول می‌باشد از میزان تولید ناخالص ملی و جهانی استفاده کرد.

دلیری پارامترهای موثر در ردپای کربن نیروگاه‌های حرارتی را به صورت شرح زیر استخراج کرد:

۱. نوع نیروگاه
۲. نوع سوخت
۳. حجم سوخت مصرفی
۴. فرسودگی اقلیم
۵. افسد کربن
۶. فاصله محل نصب تا مصرف
۷. تغییر کاربری زمین
۸. حاصلخیزی منطقه رویشی
۹. ترسیب کربن
۱۰. فاصله انتقال سوخت

V حجم مولی گاز ایده‌آل در شرایط نرمال $(0.224 \text{ m}^3/\text{g-mol})$ تعریف می‌گردد.

Q_N مقدار شدت جریان حجمی گازهای خروجی در شرایط نرمال بر حسب (Nm^3/hr) از معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$Q_N = \frac{Q(P_a 273)}{[760(T_s + 273)]} \quad (\text{معادله } ۵)$$

P_a در معادله (۵) فشار محیط برحسب (mmhg) و T_s دمای گاز خروجی از دودکش را نشان می‌دهد.

در این تحقیق علاوه بر محاسبه میزان انتشار کربن به روش آنالیز دستگاهی که در بالا بیان شد. میزان انتشار به وسیله معادلات IPCC نیز مورد بررسی قرار گرفت. این معادله ردپای کربن را به صورت تئوریک با در نظر گرفتن عواملی مانند سوخت، فرایند و دیگر پارامترهای موثر مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$PE = (Electricity_{project} \times Q_{cement}) \times EF_{grid} + (fuel_{project} \times EF_{fuel}) \quad (\text{معادله } ۶)$$

در معادله فوق، PE میزان انتشارات، $Electricity_{project}$ میزان برق مصرفی برای تولید سیمان تن سیمان (Q_{cement}/MWh) مقدار سیمان تولید شده (سال/تن سیمان)، EF_{grid} فاکتور انتشار کربن از شبکه برق $(\text{tCO}_2/\text{MWh})$ میزان سوخت مصرفی برای سیمان (TJ/year) و EF_{fuel} فاکتور انتشار کربن از سوخت مصرفی (tCO_2/TJ) ، را در یک کارخانه سیمان نشان می‌دهد. برای اینکه بتوانیم میان انتشارات را محاسبه کنیم؛ ابتدا معادله ۶ را کاملاً بسط داده و معادله ۷ را مطرح می‌کنیم:

$$PE = (Electricity_{project} \times Q_{cement}) \times EF_{grid} + (Fuel_{project} \times EF_{fuel} \times D_{fuel} \times EC_{fuel}) / 1000000 \quad (\text{معادله } ۷)$$

در معادله فوق، D_{fuel} معرف دانسیته سوخت (Kg/m^3) و EC_{fuel} معرف ارزش حرارتی سوخت (TJ/ton) مصرفی در کارخانه سیمان است.

مومنی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی وضعیت توسعه پایدار در ایران با استفاده از شاخص ردپای کربن پرداختند. در این مقاله از نظام حسابداری بخشی به شکل جدول داده - ستانده استفاده شده است. به منظور سنجش ردپای کربن در این پژوهش از دو نوع داده استفاده شده است؛

- ۱- جدول داده- ستانده ارزشی سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰.
 - ۲- آمار فیزیکی انتشار CO_2 که به طور مستقیم از گزارش ترازنامه هیدروکربوری و انرژی سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ گرفته شده است.
- از نتایج این پژوهش می‌توان به افزایش انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از تولیدات داخلی در دو بخش برق و حمل و نقل در جهت تامین نیاز داخلی در سال ۱۳۹۰ نسبت به سال ۱۳۸۵ اشاره کرد.

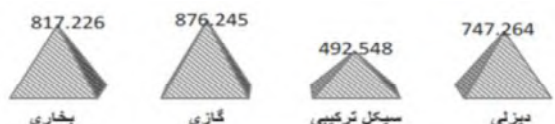
دلیر و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان "ارایه تعریف جامع ردپای کربن و روش محاسبه فراگیر منطبق بر تعریف پیشنهاد شده [۲۸] پس از



نیروژن، دی‌اکسیدکربن، مونو اکسیدکربن و مواد ریز ذره‌ای را ایجاد کرده و تأثیراتی همچون باران اسیدی، فرسایش لایه اوزون و پدیده گرمایش جهانی را به همراه دارد که این موارد جدا از تولید جیوه، آرسنیک، نیکل و سایر ضایعات ناشی از نیروگاه‌های برق با منابع فسیلی است. [۳۴] آژانس بین‌المللی انرژی گزارش می‌دهد که در سال ۲۰۱۱ حدود ۴۸ درصد از دی‌اکسیدکربن (از اصلی‌ترین عوامل افزایش دمای زمین و اثر گلخانه‌ای) منتشره جهان ناشی از سوزاندن سوخت‌ها جهت تولید الکتریسیته و گرمایش بوده است. مطابق آمارهای آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۱، کشور ایران معادل با ۵۲۰ میلیون تن دی‌اکسیدکربن تولید نموده که در این عملکرد جزء ۱۰ کشور اول دنیا قرار دارد. سرانه تولید دی‌اکسیدکربن به ازای هر نفر ۷ تن بوده و شدت انتشار کربن نیز معادل ۲/۱ کیلوگرم به ازای هر دلار تولید (به قیمت سال ۲۰۰۵) بوده است، که رقم بسیار قابل توجهی است. از سمت دیگر، همانطور که در نمودار ۱ نشان داده شده است، یک سوم سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن را بخش نیروگاهی ایران در اختیار داشته و تولیدکننده اول دی‌اکسیدکربن در سال ۱۳۹۰ بوده است. در نمودار ۲ نیز میزان انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از تولید هر کیلووات ساعت برق به تفکیک نوع نیروگاه‌ها مشاهده می‌شود. بیشترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از نیروگاه گازی و بخار است که به ترتیب ۲۴/۵ و ۳۹/۹ درصد از تولید برق کشور از این نیروگاه‌ها بوده است. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نیز ۳۰/۳ درصد در تولید برق سهم داشته‌اند.



نمودار ۱ سهم هر یک از بخش‌های مصرف‌کننده انرژی در انتشار کربن دی‌اکسید.



نمودار ۲ میزان انتشار دی‌اکسید کربن در انحاء نیروگاه‌ها به ازای تولید هر کیلووات ساعت برق

توجه به مخاطرات زیست محیطی انرژی‌های سنتی بویژه پدیده گرمایش زمین ناشی از انتشار و متمرکز شدن گازهای گلخانه‌ای از اصلی‌ترین دلایل توجه به انرژی‌های نو است و دولت‌ها را بر آن داشته تا بهره‌مندی از منابع جدید انرژی را با جدیت در دستور کار قرار داده و برای آن برنامه‌ریزی کنند. در سال‌های اخیر نیز توجه به بحران‌های انرژی و اهمیت روز افزون تنوع بخشی در عرضه انرژی جهت دستیابی به توسعه پایدار، سهم انرژی‌های جایگزین که تجدیدپذیر، پاک، با دسترسی آسان و مقرون به صرفه هستند در سبد انرژی جهانی افزایش یافته و زمینه سرمایه‌گذاری کشورها در انرژی‌های تجدیدپذیر را سبب شده است. گسترش انرژی‌های نو از منظر امنیت انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی نیز برای کشورها بسیار حائز اهمیت است تا به این وسیله وابستگی

واژکوئرو و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر و آنالیز داده‌های محیطی^۱ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در زمینه ماهیگیری را بررسی کردند. نتایج نشان داد در سراسر جهان حدود ۱/۲ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از صنعت شیلات است [۲۹].

روس و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای میزان ردپای کربن محصولات غذایی را بررسی کردند. در این مطالعه ردپای کربن با روش تغییرات استفاده از زمین صورت گرفت. نتایج نشان داد ردپای کربن ناشی از محصولات دامی، بسیار بزرگتر از محصولات گیاهی می‌باشد [۳۰].

بورمیسترز و همکاران (۲۰۱۶) به کمک روش ارزیابی چرخه زیستی در تحقیقی تحت عنوان بررسی ردپای کربن از فرایند تولید هیدروژن با استفاده از زغال سنگ به این نتیجه رسیدند که در جداسازی دی‌اکسید کربن میزان انتشار کربن از هیدروژن کمتر است [۳۱].

لازارویوس و مارتین (۲۰۱۶) با استفاده از چرخه زیستی طیف وسیعی از آب و هوا، میزان کربن ناشی از سوخت‌های زیستی حمل و نقل در سوئد را تجزیه و تحلیل نمودند و به این نتیجه رسیدند که تسلط کربن بیش از حد بر روی اثرات آب و هوا تأثیرگذار است [۳۲].

۳-۲- ردپای کربن در تولد برق از انرژی‌های تجدیدپذیر

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و لزوم اتخاذ سیاست‌های مناسب جهت کاهش آن و همچنین ضرورت دستیابی به رشد اقتصادی بالاتر در کشورهای درحال توسعه، توجه اکثر کشورها را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. در واقع انرژی‌های تجدیدپذیر یک راه‌حل مناسب برای دست یابی به توسعه پایدار تلقی می‌شود. سوخت‌های فسیلی منبع مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای و عامل اصلی گرمایش جهانی هستند. ۹۲ درصد انرژی الکتریسیته ایران از سوخت فسیلی تولید می‌شود، در نتیجه منجر به تولید ۳۵ درصد دی‌اکسیدکربن (مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای) می‌شود. در مقابل، سهم تولید برق از انرژی تجدیدپذیر در ایران تنها ۲ درصد است که سهم ناچیزی در سبد انرژی کشور است، در صورتی که با تولید برق از منابع تجدیدپذیر علاوه بر افزایش امنیت انرژی و ایجاد فرصت‌های شغلی منجر به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود؛ مطابق نتایج برآورد مدل تجربی پژوهش نیک اندیش، همکاران (۱۳۹۵) یک درصد افزایش در تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر موجب کاهش ۲ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود. به این ترتیب، توسعه انرژی تجدیدپذیر در بخش تولید برق نقش قابل توجهی دارد [۳۳].

انرژی الکتریسیته از جمله حامل‌های انرژی بسیار پرکاربرد و سطح بالایی بوده که در فرایند توسعه نیز نقش قابل توجهی در پیشبرد رشد اقتصادی دارد. اما تولید برق به منابع انرژی دیگر بخصوص سوخت‌های فسیلی وابسته است به طوری که در سال ۲۰۱۱ حدود ۶۷ درصد انرژی برق جهان از این منابع، ۱۵ درصد از انرژی آبی و تنها ۴ درصد از منابع دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر تولید شده است. از طرفی، مصرف انرژی‌های سنتی و سوختن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های برق آلاینده‌های بسیاری از قبیل اکسیدهای سولفور، اکسیدهای

^۱DEA



به طور کلی با جایگزینی انرژی برق تولیدی از نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌توان از انتشار گازهای گلخانه‌ای کاست [۳۵]. در سال‌های اخیر، در ایران اقدامات جدی‌تری در راستای افزایش تولید برق از انرژی‌های نو انجام شده است. تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر یک فرایند سرمایه‌بر است و غیر از هزینه‌های نصب ظرفیت پشتیبان مورد نیاز برای این نوع انرژی‌ها، هزینه‌هایی که تولید برق از انرژی‌های نو با آن مواجه است عمدتاً هزینه‌های نصب ظرفیت و هزینه‌های ثابت عملیاتی هستند و چیزی حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد کل هزینه‌های عرضه انرژی را در بر می‌گیرد که علت اصلی بالا بودن سطح قیمت برق تولیدی این منابع نسبت به منابع فسیلی است. اما بخشی از این هزینه‌ها را با محاسبه کردن ردپای کربن ذخیره شده در صورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی و منظور کردن منافع زیست محیطی و هزینه‌های کمتری که این نوع انرژی به محیط زیست تحمیل می‌کند و همینطور صرفه‌جویی‌های ناشی از کاهش هزینه‌های سوخت فسیلی میتوان پوشش داد [۳۶].

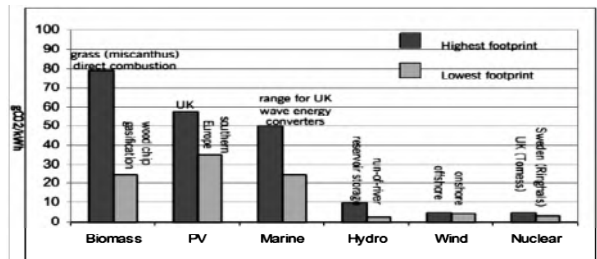
صادقی و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله تحت عنوان "نقش تولید برق از منابع تجدیدپذیر در کاهش گازهای گلخانه‌ای" به ارزیابی تأثیر برق تولیدی از انرژی‌های تجدیدپذیر در کاهش انتشار CO₂ ایران با بهره‌گیری از روش خودرگرسیون با وقفه‌های گسترده پرداخته است. بر اساس نتایج این بررسی یک درصد افزایش تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر با کاهش ۰/۳۱ درصدی در بلند مدت و در کوتاه مدت ۰/۰۷ درصد از انتشار دی اکسید کربن به عنوان اصلی‌ترین گاز گلخانه‌ای خواهد بود. به این ترتیب، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود کارایی انرژی‌های فسیلی قابل توجه در کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند. با توجه به علامت مثبت ضریب مصرف انرژی و کاهش ۱/۱ درصدی انتشار کربن دی اکسید نسبت به مصرف انرژی و کاهش ۰/۳۱ درصدی و منفی انتشار کربن دی اکسید نسبت به تولید برق به وسیله انرژی‌های نو، از موثرترین سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای در ایران می‌تواند توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و مهم‌تر از آن افزایش کارایی انرژی باشد. نکته قابل توجه این است که سیاست‌های اتخاذی می‌بایست به صورت مداوم و پیوسته اجرا شوند تا تأثیر دائمی داشته باشند.

صادقی (۲۰۱۷) در پژوهشی با استفاده از داده‌های سری زمانی ایران (۲۰۱۲-۱۹۸۰) و با روش الگوی خود رگرسیون ساختاری (SVAR) به تحلیل رابطه پویا میان سه متغیر انرژی تجدیدپذیر، رشد اقتصادی و انتشار دی‌اکسیدکربن پرداخت. این روش به روابط متقابل همه متغیرها توجه داشته و نیز قادر به پیش‌بینی اثرات عملکرد سیاست‌ها و تغییرات مهم اقتصادی است. نتایج حاصل از برآورد الگوی ساختاری خودهمبسته برداری نشان می‌دهد که شوک مثبت در مصرف انرژی تجدیدپذیر با ضریب مثبت بر تغییرات رشد اقتصادی اثر می‌گذارد. از آن جایی که انرژی به عنوان نیروی محرکه‌ای در جریان رشد و توسعه اقتصادی است، بنابراین انتظار می‌رود که چنین رابطه‌مبثتی برقرار باشد. اما برخلاف انتظار ملاحظه شد که شوک مثبت در مصرف انرژی تجدیدپذیر با ضریب مثبت بر انتشار دی‌اکسیدکربن اثر گذاشته و شاهد آن هستیم که در اقتصاد ایران استفاده از انرژی تجدیدپذیر موجب کاهش در انتشار کربن دی

خود را به کشورهای صادرکننده انرژی‌های تجدیدناپذیر کاهش داده و ثبات اقتصادی بیشتری را مهیا کنند [۳۴].

انرژی باد در بین انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین روش‌های تولید برق می‌باشد که آلودگی زیست محیطی در پی نداشته و پایا ناپذیر نیز می‌باشد. توربین‌های بادی برای راه‌اندازی و بهره‌برداری نیاز به هیچ گونه سوختی ندارند و بنابراین در قبال تولید انرژی الکتریکی آلودگی مستقیمی ایجاد نمی‌کنند. بهره‌برداری از این توربین‌ها دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، جیوه، ذرات معلق یا هیچ گونه عامل آلوده کننده هوا تولید نمی‌کند. اما توربین‌های بادی در مراحل ساخت از منابع مختلفی استفاده می‌کنند. در طول ساخت نیروگاه‌های بادی باید از موادی مانند فولاد، بتن، آلومینیوم و ... استفاده کرد که تولید انتقال آن‌ها نیازمند مصرف انواع سوخت‌ها است. دی‌اکسید کربن تولید شده در این مراحل پس از حدود ۹ ماه کار کردن نیروگاه جبران خواهد شد. نیروگاه‌های سوخت فسیلی که برای تنظیم برق تولیدی در نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند موجب ایجاد آلودگی خواهند شد. بعضی از اوقات به این نکته اشاره می‌شود که نیروگاه‌های بادی نمی‌توانند میزان دی‌اکسید کربن تولیدی را کاهش دهند چراکه برق تولیدی از طریق نیروگاه بادی به دلیل نامنظم بودن همیشه باید به وسیله یک نیروگاه سوخت فسیلی پشتیبانی شود. نیروگاه‌های بادی نمی‌توانند به طور کامل جایگزین نیروگاه‌های سوخت فسیلی شوند اما با تولید انرژی الکتریکی مبنای تولیدی نیروگاه‌های حرارتی را کاهش داده و از تولید آن‌ها می‌کاهند که به این ترتیب میزان انتشار دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

بزرگترین پتانسیل کاهش ردپای کربن در تولید برق استفاده از فناوری‌های نوین تولید برق، و در نتیجه ذخیره کربن می‌باشد، بخشی از این فناوری‌ها که دارای پتانسیل برای کاهش راندمان کربن هستند در نمودار ۳ به همراه میزان کربن تولیدی به ازای تولید یک کیلووات ساعت برق تولیدی آورده شده است.



نمودار ۳ دامنه ردپای کربن برای تکنولوژی‌های کم کربن در انگلستان و اروپا (گرم CO₂ در هر کیلووات ساعت برق تولیدی)

طبق آمار موجود تولید یک کیلووات ساعت انرژی برق بادی از انتشار آلاینده‌های زیست محیطی به شرح زیر جلوگیری می‌نماد:

دی‌اکسید کربن	۸۵۰ گرم
دراکسید گوگرد	۲۹ گرم
اکسیدنیتروزن	۲/۶ گرم
خاک	۰/۱ گرم
خاکستر	۵۵ گرم

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مفاهیمی چون ردپای کربن، روش‌های محاسبه آن و لزوم جایگزینی استفاده از منابع انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به جای منابع سوخت‌های فسیلی پرداخته شده است. بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه ردپای کربن در تولید برق، نیروگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی جهت تولید برق استفاده می‌کنند متصاعد کننده آلاینده‌های مضر به محیط اطراف هستند. این آلاینده‌ها اثرات جبران‌ناپذیری بر محیط و سلامت انسان بر جای می‌گذارد. از طرفی به دلیل افزایش جمعیت نیاز به مصرف برق روز به روز در حال افزایش است. بنابراین جهت رفع این نیازها لازم است تمهیداتی صورت بگیرد. همچنین با توجه به وجود پتانسیل‌های انرژی خورشیدی، زمین‌گرایی، زیست توده و بادی در کشور ایران سهم این انرژی‌ها در بخش‌های مختلف در طی سال‌های آتی افزایش می‌یابد. انتشار پایین کربن‌دی‌اکسید در طول روند تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر یکی دیگر از دلایل لزوم افزایش سهم این نوع منبع انرژی در سبد انرژی کشور می‌باشد. با محاسبه کردن ردپای کربن ذخیره شده در صورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی و منظورکردن منافع زیست محیطی میتوان اثرات مفید استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را به صورت ملموس‌تری نمایش دهد. تحلیل ردپای کربن میتواند به فهم و آگاهی افراد از آثار فعالیت انسان‌ها و سازمان‌ها بر محیط زیست کمک کند و برای کاهش انتشار کربن و تغییرات آب و هوایی کشورها منابع علمی ارائه دهد.

منابع

- [1] A. Druckman and T. Jackson, "The carbon footprint of UK households 1990–2004: a socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input–output model," *Ecol. Econ.*, vol. 68, no. 7, pp. 2066–2077, 2009.
- [2] E. G. Hertwich and G. P. Peters, "Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 16, pp. 6414–6420, 2009.
- [3] I. Moffatt, "Ecological footprints and sustainable development," *Ecol. Econ.*, vol. 32, no. 3, pp. 359–362, 2000.
- [4] K.-H. Erb, "Actual land demand of Austria 1926–2000: a variation on ecological footprint assessments," *Land use policy*, vol. 21, no. 3, pp. 247–259, 2004.
- [5] M. Wackernagel and W. Rees, *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*, vol. 9. New Society Publishers, 1998.
- [6] K. B. Bicknell, R. J. Ball, R. Cullen, and H. R. Bigsby, "New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy," *Ecol. Econ.*, vol. 27, no. 2, pp. 149–160, 1998.
- [7] T. Wiedmann and J. Minx, "A definition of 'carbon footprint,'" *Ecol. Econ. Res. trends*, vol. 1, pp. 1–11, 2008.
- [8] G. Hammond, "Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue," *Nature*, vol. 445, no. 7125, p. 256, 2007.
- [9] B. Petroleum, "What is a carbon footprint?," 2009-07-30]. http://www.bp.com/liveassets/bp_inter-net/global/6p/Energetics. 2007.

اکسید نشده است، می‌توان دلیل این امر را در سهم پایین این نوع از انرژی در سبد کل انرژی کشور جستجو کرد که با وجود ظرفیت بالای منابع تجدیدپذیر در ایران، استفاده بسیار محدودی از این منبع انرژی صورت گرفته و نیز از طرفی تکنولوژی ضعیف و قدیمی در روند تولید داخل منجر به انتشار بیشتر دی اکسید کربن در استفاده بیشتر انرژی شده است و همین امر می‌تواند عامل مهمی در خنثی شدن اثر مثبت استفاده از منابع تجدیدپذیر شود [۳۷].

قفاری و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی تحت عنوان "تأثیر انرژی باد بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂" در ۱۴ کشور منتخب آسیا پرداختند. یافته‌ها حاکی از این است که رابطه علی کوتاه مدت دو طرفه بین انتشار CO₂ و رشد GDP وجود دارد که می‌توان به فرضیه زیست محیطی کوزنتیس اشاره کرد. این فرضیه بیان میکند که مراحل اولیه رشد آلودگی‌های زیست محیطی بیشتر می‌شود تا به یک نقطه حداکثر می‌رسد و از آن مرحله به بعد با افزایش رشد اقتصادی آلودگی‌های زیست محیطی کاهش می‌یابد. با توجه به این فرضیه، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که کشورهای مورد مطالعه در مرحله اول منحنی U شکل معکوس کوزنتیس قرار دارند و همچنین هیچ ارتباطی بین انرژی باد و انتشار CO₂ وجود ندارد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود دولت و بخش خصوصی در زمینه توسعه سرمایه گذاری‌ها در انرژی بادی که از یک سو موجب افزایش رشد اقتصادی شده و از سوی دیگر آلودگی محیط زیست را به دنبال ندارد، اقدام و اهتمام نمایند [۳۸].

موفوتا و همکاران (۲۰۱۸) در مالزی به بررسی اثرات منفرد مصرف برق هیدروالکتریکی با روش ردپای کربن و انتشار دی‌اکسیدکربن به عنوان متغیرهای هدف استفاده کردند. نتایج نشان داد مصرف برق هیدروالکتریک به طور قابل توجهی از انتشار کربن جلوگیری می‌کند و همچنین به طور چشم گیری کاهش تخریب محیط زیست را دربر دارد [۳۹].

آمان و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی تأثیر ایمنی، بهداشت، محیط زیست در سیستم های تولید برق از سلول‌های خورشیدی پرداختند، آنها بیان کردند تولید سیستم‌های انرژی خورشیدی در جهان به علت همیشگی بودن این انرژی ، ویژگی های سازگار با محیط زیست و غلبه بر کمبود سوخت انرژی احتمالی در آینده نزدیک به طور عمده افزایش یافته است. انرژی خورشیدی در مقایسه با منابع انرژی متعارف، مزایای زیست محیطی فراوانی دارد. علاوه بر حفظ منابع طبیعی، مزیت اصلی آنها عدم تقریباً هر نوع انتشار هوا یا مواد زائد در طول عملیات است. رشد روزافزون صنعت خورشیدی قابل توجه است، با این حال، در فرایند تولید نیروگاه‌های خورشیدی و انهدام آنها کربن قابل ملاحظه‌ای منتشر میشود که آمان و همکاران راه‌حلی نظیر بهبود تکنولوژی و افزایش کاراییو ... برای کاهش انتشار کربن ارائه دادند [۴۰].

محققان بسیاری به بررسی و مقایسه انتشار دی‌اکسیدکربن بر پایه تکنولوژی های مختلف انرژی از انواع مختلف نیروگاه‌ها از جمله خورشیدی، بادی، سیکل ترکیبی، گازی، اتمی، آبی پرداخته‌اند. از میان مطالعات دسته آخر می‌توان به پژوهش های تاکنون و کنان (۲۰۱۴) [۴۱]، ولده میثاییل آسفا (۲۰۱۶) بر روی سوخت های زیستی [۴۲]، دوس سانتز (۲۰۱۶) بر روی تصفیه فاضلاب اشاره نمود [۴۳].



- [26] س. ک. صادقی، ز. کریمی تکنلو، م. ع. متفکر آزاد، ح. اصغرپور قورچی، ی. اندایش، "مطالعه وضعیت رد پای کربن، متان و اکسید نیتروژن زیربخش‌های کشاورزی در مقایسه با سایر بخش‌های اقتصادی در ایران با رهیافت ماتریس حسابداری اجتماعی"، (SAM) فصلنامه علمی - پژوهشی، پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی، vol. 5, no. 5, pp. 13-30, Dec. 2015.
- [27] ا. حاجی نژاد، ح. یوسفی، ا. بهمه، "بررسی ردپای کربن در تامین آب شرب شهر سپیدان"، اکوهیدرولوژی، دوره 5، شماره یک، pp. 241-249, 1397.
- [28] ف. دلیر، م. ش. پورمطلق، خ. اشرفی، "ارایه تعریف جامع ردپای کربن و روش محاسبه فراگیر منطبق بر تعریف پیشنهادی"، pdf بیست و پنجمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، vol. تهران، دان، no. ISME25_774, 1396.
- [29] I. Vázquez-Rowe, P. Villanueva-Rey, M. T. Moreira, and G. Feijoo, "A review of energy use and greenhouse gas emissions from worldwide hake fishing," in *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 2*, Springer, 2014, pp. 1-29.
- [30] E. Röös, C. Sundberg, and P.-A. Hansson, "Carbon footprint of food products," in *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1*, Springer, 2014, pp. 85-112.
- [31] P. Burmistrz, T. Chmielniak, L. Czepirski, and M. Gazda-Grzywacz, "Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification," *J. Clean. Prod.*, vol. 139, pp. 858-865, 2016.
- [32] D. Lazarevic and M. Martin, "Life cycle assessments, carbon footprints and carbon visions: Analysing environmental systems analyses of transportation biofuels in Sweden," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 249-257, 2016.
- [33] س. نیک اندیش، ز. نصراللهی، ح. انصاری سامانی، "تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر و انتشار کربن دی‌اکسید ایران و گروهی از کشورهای منتخب"، دهمین کنگره پیشگامان پیشرفت، تهران، مرکز الگوی اسلامی ایرانی پیشرفت، 1395، pp. 43-56.
- [34] S. C. Bhattacharyya, *Energy economics: concepts, issues, markets and governance*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [35] B. Torgler and M. A. Garcia-Valiñas, "The determinants of individuals' attitudes towards preventing environmental damage," *Ecol. Econ.*, vol. 63, no. 2-3, pp. 536-552, 2007.
- [36] ح. صادقی، م. نوری، ک. بیابانی، "نقش تولید برق از منابع تجدیدپذیر در کاهش گازهای گلخانه‌ای"، نشریه انرژی ایران، دوره 17، شماره 3، pp. 23-37, 1393.
- [37] س. صادقی، س. ابراهیمی، "تأثیر توسعه مالی، تولید ناخالص داخلی و مصرف انرژی بر آلودگی محیط زیست در ایران رهیافت (ARDL)", فصلنامه اقتصاد محیط زیست و انرژی، سال دوم، شماره 7، pp. 73-43, 1392.
- [38] ه. غفاری، م. مولایی، "تأثیر مصرف انرژی بادی بر رشد اقتصادی و انتشار CO₂", فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، 2، p. 3: (253-229-1395).
- [10] A. Eckel, "The Reality of Carbon Neutrality," *Energetics*, vol. 21, no. 2, pp. 35-36, 2007.
- [11] G. Ellis, "Meeting the carbon challenge: the role of commercial real estate owners, users & managers," *Grubb Ellis Company, Chicago Google Sch.*, 2007.
- [12] E. Johnson, "Charcoal versus LPG grilling: a carbon-footprint comparison," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 29, no. 6, pp. 370-378, 2009.
- [13] K. L. Mays, P. B. Shepson, B. H. Stirm, A. Karion, C. Sweeney, and K. R. Gurney, "Aircraft-based measurements of the carbon footprint of Indianapolis," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 20, pp. 7816-7823, 2009.
- [14] I. Williams, S. Kemp, J. Coello, D. A. Turner, and L. A. Wright, "A beginner's guide to carbon footprinting," *Carbon Manag.*, vol. 3, no. 1, pp. 55-67, 2012.
- [15] A. J. Alsaffar, K. R. Haapala, K.-Y. Kim, and G. E. O. Kremer, "A process-based approach for cradle-to-gate energy and carbon footprint reduction in product design," in *ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 40th North American Manufacturing Research Conference and in participation with the International Conference on Tribology Materials and Processing*, 2012, pp. 1141-1150.
- [16] J. Solís-Guzmán, A. Martínez-Rocamora, and M. Marrero, "Methodology for determining the carbon footprint of the construction of residential buildings," in *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1*, Springer, 2014, pp. 49-83.
- [17] محمد، ولایت زاده، س. د. امامی، ز. ناصرزاده، "بررسی وضعیت توسعه پایدار در ایران با استفاده از شاخص ردپای کربن"، فصلنامه اقتصاد محیط زیست و منابع طبیعی، vol. 1, no. 1, pp. 65-93, Sep. 2016.
- [18] S. L. D. Andrews, "A classification of carbon footprint methods used by companies," Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division, 2009.
- [19] A. J. East, "What is a Carbon Footprint? An overview of definitions and methodologies," in *Vegetable industry carbon footprint scoping study—Discussion papers and workshop, 26 September 2008*, 2008.
- [20] K. Kleiner, "The corporate race to cut carbon," *Nat. Reports Clim. Chang.*, pp. 40-43, 2007.
- [21] K. Hubacek, D. Guan, J. Barrett, and T. Wiedmann, "Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: Ecological and water footprints," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 14, pp. 1241-1248, 2009.
- [22] M. Lenzen and S. A. Murray, "A modified ecological footprint method and its application to Australia," *Ecol. Econ.*, vol. 37, no. 2, pp. 229-255, 2001.
- [23] J.-J. Ferng, "Using composition of land multiplier to estimate ecological footprints associated with production activity," *Ecol. Econ.*, vol. 37, no. 2, pp. 159-172, 2001.
- [24] B. Foran, M. Lenzen, and C. Dey, "Balancing act: a triple bottom line analysis of the Australian economy," 2005.
- [25] ا. تیموری، ا. محمدی فر، "بررسی روند تغییرات رد پای اکولوژیکی سوخت‌های فسیلی استان‌های کشور ۱۳۷۸-۱۳۸۸"، *srtc-amar*, vol. 3, no. 4, pp. 40-45, Nov. 2015.



- [39] M. O. Bello, S. A. Solarin, and Y. Y. Yen, "The impact of electricity consumption on CO₂ emission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint: The role of hydropower in an emerging economy," *J. Environ. Manage.*, vol. 219, pp. 218–230, 2018.
- [40] M. M. Aman *et al.*, "A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1190–1204, 2015.
- [41] K. Tokunaga and D. E. Konan, "Home grown or imported? Biofuels life cycle GHG emissions in electricity generation and transportation," *Appl. Energy*, vol. 125, pp. 123–131, 2014.
- [42] Y. Weldemichael and G. Assefa, "Assessing the energy production and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation potential of biomass resources for Alberta," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4257–4264, 2016.
- [43] I. F. S. dos Santos, R. M. Barros, and G. L. Tiago Filho, "Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential," *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 504–514, 2016.

