Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Research Paper

Evaluation of carbon footprint in steam and combined cycle power plants and comparison with coal-fired power plants

Seyed Farhan Moosavian[1], Ahmad Hajinezhad[1*], Soheil Hashemi Zonouzi[1], Daryoosh Borzuei[2]

[1] Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran
[2] Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

ARTICLE INFO

Article History:

Received 10 January 2022
Revised 29 January 2022
Accepted 24 March 2022

Keywords:
Carbon Footprint
Electricity Generation
Fossil Fuel Power Plant
Environmental Impact Assessment

ABSTRACT

The increasing emission of greenhouse gases as the most crucial factor in global warming has made this a global concern in recent years. One concept proposed to better understand the amount of greenhouse gas emissions is the carbon footprint. Carbon footprint is the amount of greenhouse gases produced by a particular product or activity in its simplest definition. Since the power generation industry is one of the most highly emitting sectors, the study of carbon footprint has also become significant. This is primarily because fossil fuels are still the number one energy source for electricity generation, and even coal-fired power plants, which have the highest greenhouse gas emissions, will be the number one source in the coming years. They will still have a high share. Therefore, in the present study, while examining the concept of carbon footprint and its calculation method in the electricity industry, in a case study of South Khorasan province, the carbon footprint from steam and combined cycle gas and diesel power plants has been compared with Tabas coal-fired power plant. The obtained results show that the site's elevation according to the air density can have up to 10% impact the carbon footprint of the combined cycle power plant, and sites with low height should be chosen as much as possible. Also, the carbon footprint of the coal-burning power plant with a value of 968 grams per kilowatt hour is far higher than other fossil power plants with a value of 579 grams per kilowatt hour.

Introduction

With the growth of industrial activities and the rapid increase of population in the last few decades, the investigation of the effects of these activities on the environment has become important in scientific and public forums. The issue of greenhouse gas emissions as one of the effects of human activities on the environment is also included in this category. Researchers have presented various definitions and approaches to evaluate the extent of these effects. One of these definitions is the concept of "footprint." This concept indicates how much physical (environmental) capital has been reduced on a global scale to meet the internal needs of society, including the need for energy. Therefore, the purpose of defining the carbon footprint is to introduce a tool and measure the amount of carbon caused by human activities imposed on the environment.

Materials and methods

Since the purpose of the present study is to compare the coal-fired heating power plant with the combined cycle and heating power plants built in South Khorasan province, only relatively effective parameters have been included in the calculations. Therefore, the system's boundaries for calculating the carbon footprint in the current research are from the fuel refinery (tanks) to the power station of the power plant. Based on this, the amount of carbon emission during the transfer of fuel and its combustion in the power plant is calculated for each

* Corresponding Author, Email: hajinezhad@ut.ac.ir

kilowatt-hour of net electricity produced (taking into account the parameters affecting the power plant's production and deducting domestic consumption).

Result

Figure 1 shows the carbon footprint of combined cycle and heating power plants in various South Khorasan province places.

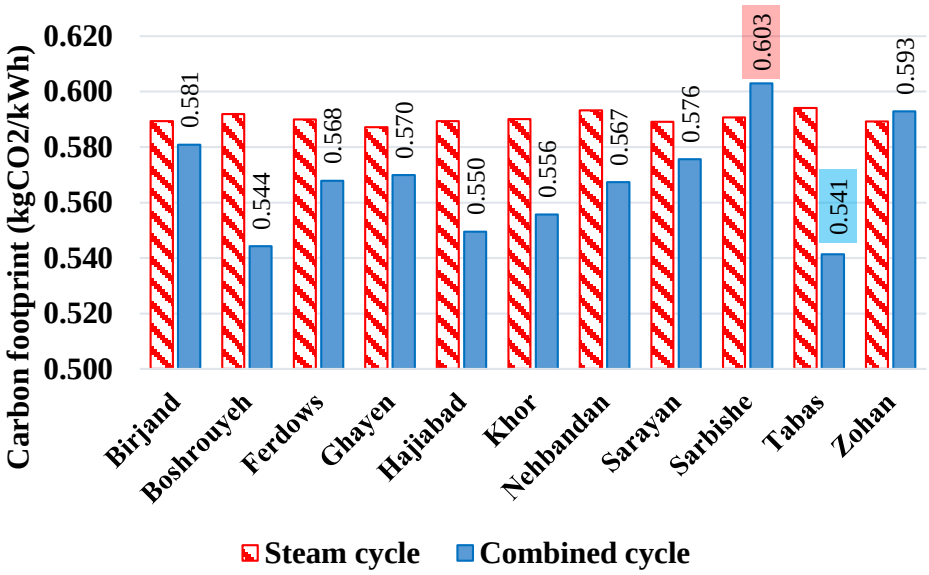


Fig. 1. Comparison of the carbon footprint of combined cycle and heating power plants

As can be seen, the combined cycle power plant in Tabas has the lowest carbon footprint, and the combined cycle power plant in Sarbisheh has the highest carbon footprint. This issue is due to the low altitude of Tabas (711 meters) and the high altitude (1846 meters) of the Darya plan, which is caused by the decrease in the production power of the combined cycle power plant at high altitudes due to the lower air density.

Discussion and Conclusion

In this research, the concept of the carbon footprint was discussed, and the sources of calculation and the results obtained from it were discussed. Also, as a case study, the carbon footprint of combined cycle and gas power plants with fuel gas and diesel in the Southern province is calculated and compared with the Tabas coal power plant, which is being built in Khorasan. The results indicated that, firstly, the height of the building could have an effect on the carbon footprint of the combined cycle power plant, and even if possible, choose sites with a low height. Secondly, the carbon footprint of coal-burning power plants is more than other fossil power plants.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

ارزیابی ردپای کربن در نیروگاه‌های بخار و سیکل ترکیبی و مقایسهٔ آن با نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز

سید فرحان موسویان[۱]، احمد حاجی‌نژاد[۱*]، سهیل هاشمی زنوزی[۱]، داریوش برزوئی[۲]

[۱] دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

[۲] دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت تهران

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۰۴

کلیدواژه:

ردپای کربن

تولید برق

سوخت‌های فسیلی

نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز

چکیده

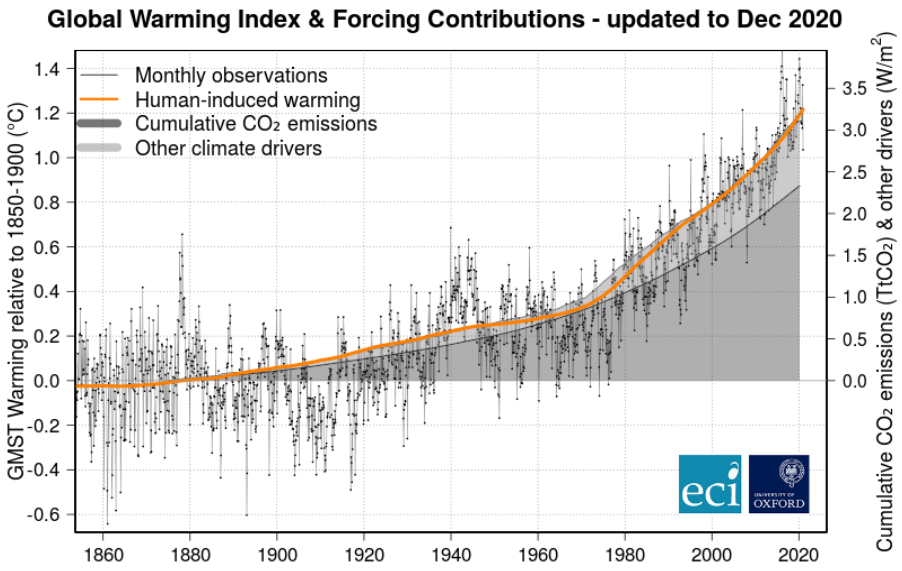
انتشار فزایندهٔ گازهای گلخانه‌ای به عنوان مهم‌ترین عامل گرمایش جهانی، این موضوع را در سال‌های اخیر به یک نگرانی و معضل بزرگ تبدیل کرده است. یکی از مفاهیمی که برای درک روشن‌تر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مطرح شده، ردپای کربن است. در ساده‌ترین تعریف می‌توان گفت که ردپای کربن عبارت است از: مقدار گازهای گلخانه‌ای حاصل از تولید یک محصول یا فعالیت مشخص. از آنجا که صنعت تولید برق، جزء صنایع اصلی آلاینده است، بررسی ردپای کربن در این بخش اهمیت ویژه‌ای دارد، چراکه سوخت‌های فسیلی همچنان در رتبهٔ اول منابع تأمین انرژی برای تولید برق هستند. نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز که دارای بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، جایگاه اول را در این زمینه به خود اختصاص داده و حتی در سال‌های آینده نیز سهم زیادی خواهند داشت. در مقالهٔ حاضر، ضمن بررسی مفهوم ردپای کربن و روش محاسبهٔ آن در صنعت برق، به صورت موردی در استان خراسان جنوبی، ردپای کربن حاصل از نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سوخت گاز و گازوئیل با نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد ارتفاع ساختگاه با توجه به چگالی هوا می‌تواند تا ۱۰ درصد بر میزان ردپای کربن نیروگاه سیکل ترکیبی تأثیر داشته باشد و تا حد امکان باید سایت‌هایی با ارتفاع کم را انتخاب کرد. همچنین، ردپای کربن نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز با مقدار ۹۶۸ گرم به ازای هر کیلووات ساعت به مراتب بالاتر از نیروگاه‌های فسیلی دیگر با مقدار ۵۷۹ گرم به ازای هر کیلوات ساعت است.

مقدمه

رابطهٔ گرمایش جهانی با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در چند دههٔ اخیر یکی از موضوعات اصلی تحقیقات حوزهٔ محیط زیست در سطح جهان بوده است و بر وجود رابطهٔ مستقیم بین آن‌ها اتفاق‌نظر نسبی وجود دارد [۱]. مجموع گازهای گلخانه‌ای منتشرشده (برحسب کربن دی‌اکسید معادل) طی سال‌های ۱۸۸۰ تا ۲۰۲۰ میلادی، در شکل ۱ ارائه شده است [۲]. این نمودار نیز به‌روشنی مؤید تأثیر گازهای گلخانه‌ای بر گرمایش جهانی است؛ به طوری که تقریباً از سال ۱۹۶۰ با شدت گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای، دمای سطح زمین نیز روندی تصاعدی داشته است [۳].

* نویسندهٔ مسئول

Email: hajinezhad@ut.ac.ir



شکل ۱. تغییرات دمای سطح زمین و میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید [۴]

به طور کلی، با رشد فعالیت‌های صنعتی و افزایش سریع جمعیت در چند دههٔ اخیر، بررسی آثار این فعالیت‌ها بر محیط زیست در مجامع علمی و عمومی اهمیت یافته و پژوهش‌های متعددی حول این موضوعات انجام گرفته است. مسئلهٔ انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان یکی از اثرات فعالیت‌های انسانی بر محیط زیست نیز در این زمره قرار می‌گیرد [۵]. به منظور ارزیابی میزان این اثرات، تا کنون تعاریف و رویکردهای مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده است. یکی از این تعاریف، مفهوم «ردپا» است. این مفهوم بیانگر آن است که برای تأمین نیازهای درونی یک جامعه اعم از نیاز به انرژی، چه میزان از سرمایهٔ فیزیکی (زیست‌محیطی) در مقیاس جهانی کاسته شده است [۶]. تاریخچهٔ این موضوع به پژوهش‌های واکرناگل و ریس در ۱۹۹۸ میلادی بازمی‌گردد که در واقع تحت عنوان کلی‌تر ردپای اکولوژیکی (شامل: کشاورزی، ماهیگیری، ساختگاه، مرتع، جنگل و کربن) مطرح شده است [۷]. بنابراین، هدف از تعریف ردپای کربن معرفی ابزار و معیاری برای سنجش میزان کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی است که به محیط زیست تحمیل می‌شود [۸].

در حال حاضر، بیش از ۶۵ درصد از کل انرژی الکتریکی دنیا به وسیلهٔ نیروگاه‌های فسیلی تأمین می‌شود [۹] که البته در کشور ایران این میزان حدود ۹۴ درصد است. امروزه، بخش تولید الکتریسیته به‌تنهایی حدود ۴۰ درصد از کربن منتشرشده در حوزهٔ انرژی را شامل می‌شود [۲]. در صورت در نظر گرفتن سناریوی محدود کردن افزایش دمای زمین به ۲ درجهٔ سانتی‌گراد، باید ۳۹ درصد از گازهای گلخانه‌ای ناشی از نیروگاه‌ها کاهش یابد [۳]. بنابراین، روشن است که ارزیابی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیروگاه‌های فسیلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

براساس آمار جهانی، زغال‌سنگ، با وجود میزان زیاد انتشار کربن ناشی از احتراق آن، همچنان بیشترین سهم در بین سوخت‌های فسیلی را در تولید الکتریسته دارد [۱۰]. این امر بیشتر به دلیل وجود منابع عظیم زغال‌سنگ در کشورهایی همچون چین، هند و آمریکاست. در کشور ایران به دلیل ذخایر کم زغال‌سنگ و فراوانی سوخت‌های فسیلی دیگر همچون نفت و گاز، از زغال‌سنگ استقبال زیادی نشده است؛ اما در سال‌های اخیر احداث یک نیروگاه از این نوع در مجاورت معدن زغال‌سنگ طبس آغاز شده و مراحل اجرایی آن در جریان است [۱۱].

با توجه به اهمیت مطالعهٔ ردپای کربن و گازهای گلخانه‌ای در کاهش پدیده‌های نامطلوب زیست‌محیطی همچون گرمایش جهانی و آلودگی‌های محیطی، در ادامه مروری بر برجسته‌ترین پژوهش‌های انجام‌گرفته در این خصوص، می‌شود.

مرور پژوهش‌های پیشین

پژوهش‌های انجام‌گرفته روی موضوع ردپای کربن بیشتر

بر ارزیابی چرخهٔ حیات طی عمر ادوات تولید انرژی (به‌خصوص تولید برق) در مقیاس ملی متمرکز بوده‌اند. این تحقیقات بیشتر مبتنی بر داده‌ها و تحلیل‌های آماری بوده و کمتر به ارائهٔ مدلی جامع برای محاسبهٔ ردپای کربن پرداخته‌اند.

در این راستا، استامفورد و همکاران [۱۲] گزینه‌های ممکن برای تأمین انرژی الکتریکی در آیندهٔ کشور انگلستان را از نظر پیامدهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی و با استفاده از طیف وسیعی از شاخص‌های پایداری، مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. آنان بیان کردند که هیچ‌یک از فناوری‌های بررسی‌شده به صورت مطلق برتر نیست و باید میان جوانب مثبت و منفی‌شان مصالحه‌ای انجام شود. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که انرژی بادی و انرژی هسته‌ای دارای کمترین اثرات مخرب زیست‌محیطی طی چرخهٔ عمر هستند. از طرفی، زغال‌سنگ و گاز ارزان‌ترین (به‌ترتیب ۷۴ و ۶۶ پوند/مگاوات ساعت) گزینه‌های ممکن هستند، اما هر دو پتانسیل گرمایش جهانی زیادی دارند (۱۰۷۲ و ۳۷۹ گرم معادل کربن‌دی‌اکسید بر کیلووات‌ساعت). پنل‌های خورشیدی نیز در عین داشتن پتانسیل گرمایش جهانی نسبتاً کم (۸۸ گرم معادل کربن‌دی‌اکسید بر کیلووات‌ساعت)، دارای هزینهٔ زیادی (۳۰۲ پوند/مگاوات ساعت) هستند. در همین راستا، هوندو [۱۳] انواع مختلفی از سیستم تولید برق را مورد بررسی قرار داد. سیستم‌های بررسی‌شده توسط وی عبارت‌اند از: زغال‌سنگ، نفت، گاز طبیعی مایع، سیکل ترکیبی گاز مایع، هسته‌ای، برق آبی، زمین گرمایی، بادی و فتوولتائیک خورشیدی. وی چرخهٔ عمر انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی را برای هر یک از گزینه‌های یادشده بررسی کرد و اذعان داشت که تجزیه‌وتحلیل بیشتری برای ارزیابی فناوری‌های تولید برق از جنبه‌های دیگری همچون اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی و امنیتی (مقولهٔ پدافندی) مورد نیاز است و ردپای کربن به‌تنهایی نمی‌تواند ملاک قضاوت واقع شود.

در خصوص مطالعهٔ اثرات زیست‌محیطی در نواحی جغرافیایی مشخص، کانان و همکاران [۱۴] دو معیار: ارزیابی چرخهٔ حیات و تجزیه‌وتحلیل هزینهٔ چرخهٔ حیات را ابزارهای مناسبی برای تعیین کمی اثرات زیست‌محیطی و پیامدهای اقتصادی ناشی از آن، عنوان کردند. آنان ضمن به‌کارگیری دو معیار یادشده برای فناوری‌های تولید برق متمرکز و پراکنده در سنگاپور یعنی توربین‌های بخار، نیروگاه سیکل ترکیبی و پنل‌های فتوولتائیک، این فناوری‌ها را از منظر آلایندگی زیست‌محیطی و صرفهٔ اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. از طرفی، ترير و همکاران [۱۵] ردپای زیست‌محیطی برق امارات را مطالعه کردند و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده عنوان کردند که وارد کردن فناوری‌های جدید به سیستم تأمین برق در مقایسه با وضعیت موجود، از منظر زیست‌محیطی و کاهش آلایندگی مفید خواهد بود. نتایج آنان در بخش عملکرد زیست‌محیطی فناوری‌های مختلف نشان می‌دهد تنوع در تولید برق با اجرای موازی سیستم جذب کربن برای نیروگاه‌های گاز طبیعی، هسته‌ای و فناوری‌های تجدیدپذیر به طور مؤثری آلاینده‌های تولیدی را به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی کاهش می‌دهد. به گفتهٔ آنان با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی منطقهٔ مورد بررسی، انرژی خورشیدی برجسته‌ترین گزینه در بین کاندیداهای تجدیدپذیر است. ازکان [۱۶] میزان انتشار سوخت‌های مختلف مصرفی در سیستم تولید برق ترکیه را مورد بررسی قرار داد. وی تنها انتشار گازهای حاصل از فرایندهای احتراق را در نظر گرفت. نتایج او گواه آن بود که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوخت‌های فسیلی می‌تواند با جایگزینی منابع انرژی تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی انجام شود. همچنین، می‌توان از مالیات کربن برای تشویق به منظور تولید برق پاک در ترکیه به منظور افزایش استقرار منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده کرد. با توجه به پتانسیل‌های فراوان منابع تجدیدپذیر در کشور ترکیه، افزایش تولید برق از آن‌ها باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تنوع بخشیدن به منابع انرژی کشور، تضمین امنیت انرژی (از دیدگاه شبکهٔ گسترده و تولید پراکنده) و حمایت از پویش‌های مقابله با تغییرات آب‌وهوایی و جوی می‌شود. در ادامه، آتیلگان و همکاران [۱۷] پایداری تولید برق در ترکیه را با استفاده از الگوریتم چرخهٔ حیات یکپارچه ارزیابی کردند. آنان ضمن استفاده از داده‌های آماری موجود، روی پتانسیل سیستم‌های انرژی مختلف در گرمایش زمین مطالعه کردند. سنگال و همکاران [۱۸] به ارزیابی چرخهٔ حیات طی عمر سوخت لیگنیت (که برای تولید برق مورد

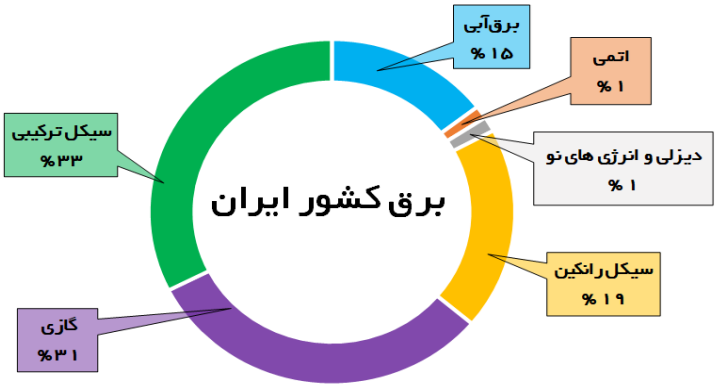
استفاده قرار می‌گیرد) در کشور ترکیه پرداختند. پژوهش آنان به محاسبهٔ انتشار گازهای معدنی از لیگنیت محدود بود. با این‌حال، انتشار گازهای معدنی و حمل‌ونقل زغال‌سنگ از طریق داده‌های آماری برای ۱۲ معدن زغال‌سنگ به صورت جزئی توسط آنان مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه، ابوالقاسمی و همکاران [۱۹] به مروری بر تاریخچه و روش‌های محاسبهٔ ردپای کربن و همچنین، بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینهٔ ردپای کربن در تولید برق حاصل از سوخت‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر پرداختند و اذعان کردند که ردپای کربن معیار مناسبی برای طبقه‌بندی فناوری‌های مختلف تولید انرژی از منظر زیست‌محیطی است. در همین راستا، دلیر و همکاران[۲۰] مدل جامعی برای محاسبهٔ ردپای کربن در نیروگاه‌های فسیلی کشور ایران ارائه دادند. آن‌ها با لحاظ کردن عوامل مختلف مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین، میزان تولید برق در انواع نیروگاه‌ها، مقدار کربن آزادشده به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی را محاسبه کردند و از این دیدگاه به مقایسهٔ نیروگاه‌ها پرداختند.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته در زمینهٔ مطالعهٔ اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های مختلف و اهمیت این مطالعات در کنترل آلایندگی زیست‌محیطی و کاهش اثرات مخرب آن‌ها، در پژوهش حاضر با هدف انتخاب نیروگاه مناسب از دیدگاه زیست‌محیطی، به مقایسهٔ ردپای کربن حاصل از نیروگاه‌های بخار و سیکل ترکیبی (با سوخت گاز و گازوئیل) با نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس در استان خراسان جنوبی پرداخته شده است. روش ردپای کربن یک روش متداول جهت محاسبهٔ مقدار کربن دی‌اکسید تولیدی بر اثر توسعهٔ یک نیروگاه معین است، ولی همان‌گونه که در قسمت مرور پژوهش‌های پیشین ملاحظه شد، تا کنون مقایسهٔ جامعی میان نیروگاه‌های بخار و سیکل ترکیبی با نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز از نظر شاخص ردپای کربن انجام نگرفته است. با توجه به خلأ موجود در مطالعات پیشین، در این مقاله به ارزیابی شاخص ردپای کربن در استان خراسان جنوبی، برای سه نیروگاه بخار، سیکل ترکیبی و زغال‌سنگ پرداخت شده است.

پس از مشخص شدن هدف اصلی و موضوع پژوهش، در ادامه در گام اول به بررسی خلاصهٔ وضعیت صنعت برق کشور پرداخته می‌شود. سپس، ضمن معرفی شاخص ردپای کربن، پارامترها و عوامل مؤثر بر آن ذکر شده و روش محاسبهٔ آن ارائه می‌شود. در نهایت، با در نظر گرفتن مشخصات جغرافیایی استان خراسان جنوبی، شاخص ردپای کربن برای نیروگاه‌های بخار، سیکل ترکیبی و زغال‌سنگ‌سوز طبس محاسبه شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه می‌شود.

خلاصهٔ وضعیت صنعت برق ایران

مجموع ظرفیت نیروگاهی کشور در سال ۱۳۹۸ حدود ۸۵۳۱۳ مگاوات بوده است. از این میزان، ۳۳ درصد مربوط به نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، ۳۱ درصد نیروگاه‌های گازی و ۱۹ درصد مربوط به سیکل رانکین است که در نمودار شکل ۲ ارائه شده است. نیروگاه‌های آبی تقریباً ۱۵ درصد از نیاز کل کشور را تأمین کرده و سایر نیروگاه‌ها شامل تجدیدپذیرها و غیره تقریباً ۲ درصد از تقاضای شبکهٔ برق ایران را تأمین می‌کنند [۱۱].



شکل ۲. سهم انواع نیروگاه‌ها در تأمین برق ایران

میانگین ردپای کربن بخش برق ایران از مرحلهٔ تأمین سوخت به نیروگاه و از تأمین برق به شبکه، ۵۷۴ $\frac{g_{CO_2}}{kWh}$ است. تلفات انتقال و توزیع در حوزه‌های دیگر شامل کاهش انرژی تحویل‌داده‌شده به مصرف‌کنندگان است [۲۰].

پارامترهای مؤثر بر ردپای کربن نیروگاه‌های فسیلی

برای شناسایی پارامترهای مؤثر در ردپای کربن نیروگاه‌های فسیلی ابتدا باید پارامترهای مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و پارامترهای مؤثر بر میزان تولید برق خالص نیروگاه مشخص شوند، چراکه برآیند پارامترهای مؤثر در انتشار گازهای گلخانه‌ای و پارامترهای مؤثر بر میزان برق تولیدی نیروگاه، مقدار کربن دی‌اکسید تولیدی و به‌تبع ردپای کربن نیروگاه را مشخص می‌کنند. در ادامه، هر یک از این عوامل به طور مختصر بررسی می‌شود.

پارامترهای مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای

به طور کلی، پارامترهای اصلی مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از عملکرد نیروگاه‌های مختلف عبارت‌اند از: نوع نیروگاه، نوع سوخت، آماده‌سازی و حمل سوخت، افست و ترسیب کربن و تغییر کاربری زمین. در زیر شرح مختصری از پارامترهای یادشده ارائه می‌شود [۲۱]:

- **نوع نیروگاه:** نوع نیروگاه شامل سه نیروگاه بخاری، گازی و سیکل ترکیبی می‌شود. این سه نیروگاه از نظر عملکرد در سیستم شبکهٔ ایران متفاوت هستند، نیروگاه بخار و سیکل ترکیبی به عنوان تأمین‌کنندهٔ بار پایه و نیروگاه گازی تأمین‌کنندهٔ بار زمان پیک هستند. در ایران در بخش دولتی و خصوصی (به‌جز صنایع بزرگ) ۲۰ نیروگاه بخار با ظرفیت نامی ۱۵۲۴۱ مگاوات، ۲۶ نیروگاه گازی با ظرفیت نامی ۲۱۳۶۶ مگاوات و ۱۹ سیکل ترکیبی با ظرفیت رسمی ۱۸۴۹۳ مگاوات وجود دارد [۱۱].
- **نوع سوخت:** نوع سوخت نیروگاه‌های فسیلی می‌تواند نفت و مشتقات آن، گاز و زغال‌سنگ باشد. در ایران بیشتر از گازوئیل، مازوت و گاز طبیعی استفاده می‌شود [۱۱]. البته همان‌طور که گفته شد، احداث یک نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز ۶۵۰ مگاواتی نیز در جریان است. در نیروگاه‌های بخاری از هر سه سوخت استفاده می‌شود و گازوئیل بیشتر به عنوان سوخت راه‌انداز مازوت به کار گرفته می‌شود. در نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی سوخت پایهٔ گاز طبیعی است و تست عملکردی و تضمینی آن نیز براساس سوخت گاز انجام می‌شود. با این‌حال، مطابق دستورالعمل توربین‌سازان می‌توان در سه ماه از سال به صورت تجمعی و البته نه مداوم از گازوئیل استفاده کرد [۲۲]. از سوخت‌های مایع نیز معمولاً در زمان‌های پیک مصرف و عدم امکان استفاده از گاز، استفاده می‌شود.
- **آماده‌سازی سوخت:** انتشار ناشی از فرایند استخراج، پالایش و انبارش، فلرها، دودکش‌ها در این مجموعه قرار می‌گیرند. درخور یادآوری است سوخت‌های متفاوت انتشار، آماده‌سازی متفاوتی دارند.
- **حمل سوخت:** پارامتر مهم دیگر طول مسیری است که سوخت از مخازن تا نیروگاه طی می‌کند. انتقال سوخت با خط لوله، راه آهن و تانکرهای جاده‌ای به نیروگاه انجام می‌شود. گاز طبیعی همیشه با خط لوله به نیروگاه تحویل می‌شود. سوخت‌های مایع بسته به شرایط متفاوت حمل می‌شوند [۲۳ و ۲۴].
- **افست کربن و ذخیره:** میزان افست کربن و ترسیب کربن در ردپای کربن نیروگاه‌های حرارتی مؤثر است [۲۵]. با توجه به اینکه تجهیزات و تکنولوژی مربوطه در ایران مرسوم نیست، در پژوهش حاضر از آنان صرف نظر می‌شود.
- **تغییر کاربری زمین:** در نیروگاه‌ها تغییر کاربری زمین به چهار صورت: تغییر زمین به ساختگاه، ساختگاه به ساختگاه، زمین به جنگل، جنگل به جنگل انجام می‌پذیرد. تغییر زمین به ساختگاه و تغییر زمین به جنگل برای هر تغییر کاربری میزان تغییر در انبار کربن المان‌ها محاسبه می‌شود [۲۰].

پارامترهای مؤثر بر میزان تولید برق خالص در نیروگاه

به طور کلی، هر نیروگاه دارای ظرفیت تولید نامی است که بسته به شرایط، میزان تولید واقعی متفاوت خواهد بود.

همچنین، بخشی از توان تولیدی صرف مصارف داخلی شده و بخشی نیز در شبکه تلف می‌شود. پارامترهای مؤثر بر میزان تولید برق خالص در نیروگاه عبارت‌اند از: فرسودگی، مصرف داخلی، شرایط محیطی، افت‌های مربوط به انتقال و توزیع که در ادامه به صورت خلاصه بررسی می‌شوند [۲۰]:

- **فرسودگی:** به طور طبیعی بر اثر کارکرد نیروگاه قطعات مختلف دچار استهلاک می‌شوند که به‌خصوص در تجهیزات اصلی یعنی توربین بخار و گاز اتفاق می‌افتد [۹]. البته، طی مدت بهره‌برداری تعمیرات اساسی روی آن‌ها انجام می‌شود که سرعت استهلاک را کاهش می‌دهند، ولی در کل این مسئله اجتناب‌ناپذیر است. عواملی مانند استفاده از سوخت مایع و تعداد و نحوهٔ استارت می‌تواند تأثیر منفی داشته باشد.
- **مصرف داخلی:** بخشی از انرژی تولیدی در نیروگاه صرف تأمین انرژی موارد داخلی مثل: روشنایی، تجهیزات جانبی و غیره می‌شود. این میزان در نیروگاه‌های بخار ۷ درصد و در سیکل ترکیبی ۱/۸ درصد است [۱۱].
- **شرایط محیطی:** اصلی‌ترین عواملی که بر عملکرد نیروگاه تأثیر دارد دمای هوا و ارتفاع ساختگاه آن است که بالا بودن هر دو بر میزان تولید نیروگاه به‌ویژه گازی و سیکل ترکیبی اثر منفی دارد، ولی در نیروگاه بخاری اثر قابل توجهی ندارد [۲۴].
- **تلفات انتقال:** هدررفت ناشی از انتقال به افت‌های انتقال در سطوح ولتاژ ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلو ولت گفته می‌شود. میزان این تلفات به وضعیت خطوط انتقال و طول آن‌ها بستگی دارد [۲۶].
- **تلفات توزیع:** تلفاتی است که در شبکهٔ داخلی هر برق منطقه‌ای رخ می‌دهد که به مشخصات شبکهٔ توزیع از جمله سطح ولتاژ و طول و غیره وابسته است [۲۶].

روش محاسبهٔ ردپای کربن

پیش از ورود به مبحث روش محاسبهٔ ردپای کربن و تعمیم آن به نیروگاه‌های مورد نظر، شایسته است تا تعریف اصلی ردپای کربن بیان شود.

تعریف ردپای کربن

برای کمی‌سازی ردپای کربن تعاریف مختلفی ارائه شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۹]:

- وزن کربن انتشاریافته برحسب کیلوگرم یا تن به ازای هر فرد یا فعالیت [۲۷]
- میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به صورت مستقیم یا غیرمستقیم ناشی از فعالیت‌ها [۱۹]
- مجموعه‌ای از گازهای گلخانه‌ای انتشاریافته از یک کالا یا سرویس در سراسر طول عمر خود [۱۳].
- گازهای گلخانه‌ای تولیدشده با مصرف سوخت‌های فسیلی به منظور تولید برق، گرمایش، حمل‌ونقل و غیره که به صورت وزن Co_2 تولیدی با واحد تن بیان می‌شود [۲۷].

همان‌طور که از چند تعریف ارائه‌شده نیز برمی‌آید، مواردی مانند گسترهٔ انتشار، مراحل چرخهٔ عمر، مرزهای سیستم، پایان عمر، ذخیرهٔ کربن، تغییر کاربری زمین، کالاها و فرایندهای واسطه و همچنین، واحد آن معمولاً به صورت مشخص قید نشده است. بنابراین، در هر مسئلهٔ خاص باید بررسی و تعیین شود.

حال با توجه به موارد یادشده، در پژوهش حاضر تعریف ردپای کربن به این صورت در نظر گرفته شده است: وزن گازهای گلخانه‌ای منتشرشده (کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن) به ازای تولید ۱ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تحویلی به شبکهٔ برق.

روش محاسبهٔ ردپای کربن

مرزهایی که برای محاسبهٔ ردپای کربن حاصل از یک فعالیت ایجاد می‌شود با یکدیگر متفاوت است. به طور خاص، در صنعت تولید برق از لحاظ چرخهٔ عمر می‌توانند دربرگیرندهٔ فرایندهای تولید تمام تجهیزات و قطعات به‌کاررفته در نیروگاه نیز باشد؛ یا کلیهٔ عملیات اجرایی مانند استفاده از ماشین‌آلات سنگین، خاکبرداری، تولید و حمل مصالح و مواردی از این دست را نیز شامل شود. به دلیل پیچیدگی‌هایی که چنین مواردی وارد محاسبات می‌کنند و اینکه میزان تأثیرشان در مقابل انتشار ناشی از فرایند تولید برق در نیروگاه در مدت بهره‌برداری قابل توجه نیست، در پژوهش حاضر از آن‌ها صرف نظر شده است. به طور کلی، از آنجا که هدف پژوهش حاضر، مقایسهٔ

نیروگاه بخاری زغال‌سنگ‌سوز با نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی قابل احداث در استان خراسان جنوبی است، تنها پارامترهایی در محاسبات دخیل شده‌اند که به طور نسبی اثرگذار هستند. به این‌ترتیب، پارامترهایی مثل تغییر کاربری زمین یا تلفات شبکه که تقریباً برای تمامی نیروگاه‌ها مشابه است، لحاظ نشده است. بنابراین، مرزهای سیستم برای محاسبهٔ ردپای کربن در پژوهش حاضر از پالایشگاه (مخازن) سوخت تا پست برق نیروگاه است. بر این اساس، میزان کربن آزادشده طی انتقال سوخت و سپس، احتراق آن در نیروگاه به ازای تولید هر کیلووات ساعت الکتریستهٔ خالص تولیدی (با لحاظ کردن پارامترهای مؤثر بر تولید نیروگاه و کسر مصارف داخلی) محاسبه می‌شود. مقدار ردپای کربن از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود:

$$Carbon\ Footprint\left(CF\right)=\frac{total\ equivalent\ CO_2\ emission}{net\ power\ produced\times time}=\frac{tc\left(kg\right)}{P'.t\left(kWh\right)} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ ۱، tc برابر کل گازهای منتشرشده است و از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود:

$$tc=ec+et \qquad (۲)$$

tc: Total emission (kg)
ec: Combustion emission (kg)
et: Fuel transport emission (kg)

همان‌طور که از روابط بالا مشخص است، برای محاسبهٔ کل گازهای گلخانه‌ای منتشرشده باید میزان انتشار در حمل‌ونقل (et) و انتشار مربوط به احتراق (ec) محاسبه شود. به این منظور، از فاکتورهای انتشار ارائه‌شده توسط IPCC استفاده می‌شود. در جدول ۱، فاکتورهای ناشی از احتراق سوخت‌های مختلف ارائه شده است.

در جدول‌های ۲ و ۳ نیز فاکتورهای ناشی از حمل سوخت‌های مختلف ارائه شده است. حمل‌ونقل گازوئیل معمولاً از طریق تانکرهای جاده‌ای یا ریلی صورت می‌گیرد که براساس آمارها تقریباً ۳۰ درصد ریلی و ۷۰ درصد جاده‌ای است [۲۸]. مصرف سوخت در حمل‌ونقل جاده‌ای ۰/۰۳۶ لیتر به ازای هر تن بار و یک کیلومتر است و این رقم در حمل‌ونقل ریلی ۰/۰۰۵۱ است [۲۰].

جدول ۱. فاکتورهای ناشی از احتراق سوخت‌های مختلف به ازای انرژی حاصله

نوع سوخت	CO_2 (kg/TJ)	CH_4 (kg/TJ)	N_2O (kg/TJ)	مجموع معادل CO_2 (kg/TJ)
گاز طبیعی	۵۶۱۰۰	۱	۰/۱	۵۶۱۵۴/۵
گازوئیل	۷۴۱۰۰	۳	۰/۶	۷۴۳۴۳
زغال‌سنگ (آنتراسیت)	۹۸۳۰۰	۱	۱/۵	۹۸۷۲۵/۵

جدول ۲. فاکتورهای ناشی از حمل سوخت‌های مختلف با خط لوله

نوع سوخت	CO_2 (kg/Mm^3)	CH_4 (kg/Mm^3)	N_2O (kg/Mm^3)	مجموع معادل CO_2 (kg/Mm^3)
گاز طبیعی	۹۵/۵	۱۸۰۰	-	۳۷۸۹۶
مشتقات نفت	۴۹۰	۵۴۰۰	-	۱۱۳۸۹۰

جدول ۳. فاکتورهای ناشی از حمل سوخت مایع با تانکر ریلی و دیزلی سنگین به ازای هر لیتر مصرفی

نوع سوخت	CO_2 (kg/L)	CH_4 (kg/L)	N_2O (kg/L)	مجموع معادل CO_2 (kg/L)
گازوئیل	۲/۳۱۹۴۳	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۳	۲/۳۲۹۸۵

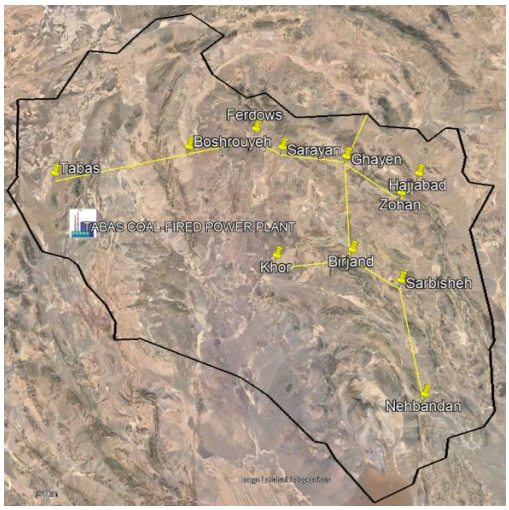
مشخصات جغرافیایی استان خراسان جنوبی

استان خراسان جنوبی با وسعتی حدود ۱۵۱۰۱۸ کیلومتر مربع، بین مدار جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۸ دقیقهٔ عرض شمالی از خط استوا و ۵۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۵۷ دقیقهٔ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است [۲۹ و ۳۰]. به منظور انجام محاسبات و مقایسهٔ بین ساختگاه‌های مختلف از لحاظ ردپای کربن، شهرستان‌های اصلی استان یعنی طبس، نهبندان، بشرویه، خور (خوسف) حاجی‌آباد، سرایان، فردوس، بیرجند، قاین، زهان و سربیشه [۳۰] در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۴ وضعیت میانگین دمای سالیانه و ارتفاع این شهرستان‌ها از سطح دریا ارائه شده است. باتوجه به اینکه ارتفاع و دمای هوا تقریباً رابطهٔ عکس با هم دارند، هر دو این عوامل باید در کنار هم دیده شوند تا برآیند اثرات روی ردپای کربن مشخص شود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یکی از پارامترهای مؤثر بر میزان ردپای کربن، حمل‌ونقل سوخت است که به طول خطوط لوله و جاده‌ها بستگی دارد. با بررسی به‌عمل‌آمده مشخص شد عمدهٔ گازرسانی به استان از طریق خط لولهٔ سرخس خانگیران تأمین می‌شود که از سمت مشهد به شهر قاین می‌رسد (شکل ۳). بر این اساس، شبکهٔ گازرسانی به شکل زیر است. در خصوص حمل‌ونقل سوخت مایع نیز فرض شده است که بیشتر از بندرعباس به این استان حمل شود. بنابراین، طول تقریبی مسیرهای سوخت‌رسانی به شرح جدول ۴ تخمین‌زده می‌شود.

جدول ۴. مشخصات شهرها و طول مسیرهای انتقال سوخت به شهرستان‌های استان خراسان جنوبی

شهر	دمای میانگین (درجهٔ سانتی‌گراد)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول تقریبی مسیر گازرسانی (کیلومتر)	طول تقریبی مسیر انتقال سوخت مایع (کیلومتر)
طبس	۲۳/۶	۷۱۱	۷۱۲	۱۰۰۰
نهبندان	۲۰/۴	۱۱۸۸	۶۸۰	۸۸۰
بشرویه	۱۹/۹	۸۸۵	۶۱۰	۹۹۰
خور	۱۹/۸	۱۰۸۰	۵۳۰	۱۰۱۰
حاجی‌آباد	۱۸/۹	۱۰۲۴	۴۸۰	۱۲۰۰
سرایان	۱۸/۴	۱۴۰۵	۴۸۰	۱۰۶۰
فردوس	۱۸/۲	۱۲۹۳	۵۲۰	۱۰۳۰
بیرجند	۱۷	۱۵۰۴	۴۹۰	۱۰۵۰
قاین	۱۵/۲	۱۴۳۲	۳۹۰	۱۱۵۰
زهان	۱۴/۹	۱۷۱۰	۴۸۰	۱۱۴۰
سربیشه	۱۳/۶	۱۸۴۶	۵۶۰	۱۰۱۰



شکل ۳. شبکهٔ گازرسانی تقریبی استان خراسان جنوبی

مقایسهٔ ردپای کربن نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس با نیروگاه بخاری و سیکل ترکیبی در سایر ساختگاه‌های استان

به منظور برآورد ردپای کربن نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی در استان خراسان جنوبی، باید میزان مصرف سوخت‌های گاز و گازوئیل تخمین زده شود. این کار بر مبنای داده‌های آماری وزارت نیرو از مصرف سوخت نیروگاه‌های کشور به شرح جدول‌های ۵ و ۶ انجام می‌شود. به این صورت که با محاسبهٔ میزان انرژی حرارتی لازم با توجه به ارزش حرارتی هر سوخت، میزان مصرف ان مشخص می‌شود.

جدول ۵. مشخصات متوسط نیروگاه‌های کشور

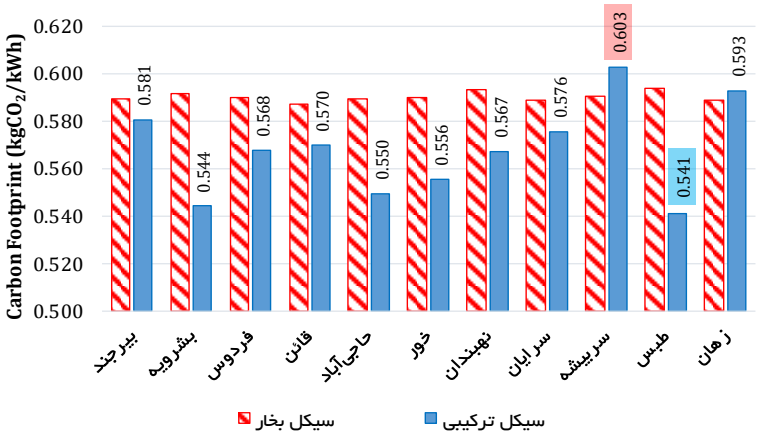
نوع نیروگاه	قدرت نامی	تولید ناخالص برق (مگاوات)	مصرف داخلی (٪)	بازده حرارتی (kJ/kWh)	درصد کارکرد در سال
بخاری	۷۸۷	۴۳۳۵۳۵۴	۷/۴	۹۸۴۹	۷۶
سیکل ترکیبی	۹۷۳	۵۰۹۵۹۵۵	۱/۸	۸۰۴۱	۸۲/۶

جدول ۶. ارزش حرارتی و میزان سوخت مصرفی متوسط نیروگاه‌های کشور

نوع سوخت	LHV (kJ/m^3)	میزان مصرف (٪)
گاز	۳۷/۶۷	۸۸
گازوئیل	۳۷۷۹۰/۱	۱۲

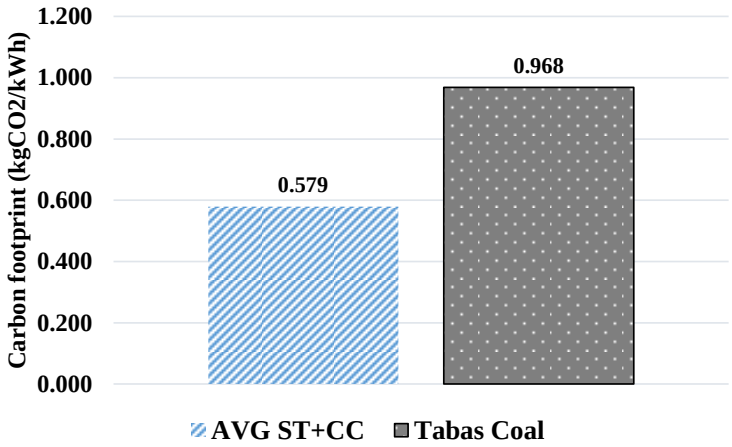
برای مقایسهٔ ردپای کربن نیروگاه بخاری زغال‌سنگ‌سوز طبس و نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی قابل احداث دیگر در استان، ظرفیت نامی تولید برابر ۶۵۰ مگاوات لحاظ شده است. همچنین، مطابق توضیحات بخش‌های قبل، تأثیرات عوامل محیطی یعنی دما و ارتفاع سایت در محاسبات توان واقعی نیروگاه سیکل ترکیبی لحاظ شده است.

در نمودار شکل ۴، ردپای کربن نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی در ساختگاه‌های مختلف استان خراسان جنوبی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیروگاه سیکل ترکیبی در طبس کمترین و نیروگاه سیکل ترکیبی در سربیشه بیشترین ردپای کربن را داشته‌اند. این موضوع به دلیل ارتفاع پایین طبس (۷۱۱ متری) و ارتفاع بالای (۱۸۴۶ متری) سربیشه از سطح دریا است که ناشی از افت توان تولیدی نیروگاه سیکل ترکیبی در ارتفاعات به علت چگالی هوای کمتر است. بنابراین، فقط انتخاب نامناسب یک ساختگاه می‌تواند موجب افزایش ۱۰ درصدی میزان ردپای کربن شود. ردپای کربن در نیروگاه‌های بخار مختلف بسیار نزدیک هم بوده و تفاوت جزئی نیز به دلیل مسافت انتقال سوخت تا محل نیروگاه است. پس به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که احداث نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در ارتفاعات بالا از لحاظ ردپای کربن شرایط نامطلوبی خواهد داشت.



شکل ۴. مقایسهٔ ردپای کربن نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی در ساختگاه‌های مختلف استان

در نمودار شکل ۵، ردپای کربن نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس با میانگین نیروگاه بخار و سیکل ترکیبی ساختگاه‌های دیگر مقایسه شده است. مطابق نمودار، ردپای کربن نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز، ۹۶۸ گرم بر کیلووات ساعت است و ردپای کربن میانگین نیروگاه بخار و سیکل ترکیبی ۵۷۹ گرم بر کیلووات ساعت است؛ از این‌رو ردپای کربن نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز بسیار بالاتر است. بنابراین، در صورتی که فقط ردپای کربن ملاک باشد، نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز گزینهٔ مناسبی به نظر نمی‌رسد. همچنین، برای یک ارزیابی جامع لازم است تمام جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مؤثر بررسی شوند.



شکل ۵. مقایسهٔ ردپای کربن میانگین نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی در استان خراسان جنوبی با نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مفهوم ردپای کربن پرداخته شد و رویکردهای محاسبه و نتایج قابل دستیابی از آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به عنوان یک نمونهٔ موردی، ردپای کربن نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سوخت گاز و گازوئیل در استان خراسان جنوبی محاسبه و با نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز طبس که در حال احداث است مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن بود که نخست ارتفاع ساختگاه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان ردپای کربن نیروگاه سیکل ترکیبی داشته باشد و تا حد امکان باید سایت‌های با ارتفاع کم را انتخاب کرد؛ دوم، ردپای کربن نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز بالاتر از نیروگاه‌های فسیلی دیگر است؛ اما با استناد به مراجع مورد بحث در مقاله، ردپای کربن به‌تنهایی به‌هیچ‌وجه نمی‌تواند ملاک عمل باشد و عوامل بسیاری مثل تنوع بخشی به منابع، اشتغال‌زایی، صرفهٔ اقتصادی و مواردی از این دست باید بررسی شوند که این امر می‌تواند در قالب ارزیابی کامل اثرات زیست‌محیطی پروژه انجام پذیرد. بررسی جامع ردپای کربن می‌تواند معیارهایی را برای انتخاب محل بهینه برای احداث نیروگاه‌ها اعم از فسیلی و زغال‌سنگ‌سوز که کمترین انتشار را داشته باشد، ارائه دهد. در پژوهش‌های بعدی پیشنهاد می‌شود یک تحلیل جامع در حوزهٔ عوامل مؤثر بر ردپای کربن نیروگاه‌ها و همچنین، مقایسهٔ نتایج با نتایج حاصل از ردپای کربن در نیروگاه‌های تجدیدپذیر پرداخت.

منابع

[1]. Moosavian SF, Borzuei D, Ahmadi A. Energy, exergy, environmental and economic analysis of the parabolic solar collector with life cycle assessment for different climate conditions. Renewable Energy. 2021;165:301-20.

[2]. Fenner AE, Kibert CJ, Woo J, Morque S, Razkenari M, Hakim H, et al. The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018;94:1142-52.

[3]. Al-Ghussain L. Global warming: review on driving forces and mitigation. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2019;38(1):13-21.

[4]. Haustein K, Allen M, Forster P, Otto F, Mitchell D, Matthews H, et al. A real-time global warming index. Scientific reports. 2017;7(1):1-6.

[5]. Heinonen J, Ottelin J, Ala-Mantila S, Wiedmann T, Clarke J, Junnila S. Spatial consumption-based carbon footprint assessments-A review of recent developments in the field. Journal of Cleaner Production. 2020;256:120335.

[6]. Borzuei D, Moosavian SF, Ahmadi A, Ahmadi R, Bagherzadeh K. An Experimental and Analytical Study of Influential Parameters of Parabolic Trough Solar Collector. Journal of Renewable Energy and Environment. 2021.

[7]. Wackernagel M, Rees W. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth: New society publishers; 1998.

[8]. Onat NC, Kucukvar M. Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020;124:109783.

[9]. Borzuei D, Moosavian SF, Farajollahi M. On the Performance Enhancement of the Three-Blade Savonius Wind Turbine Implementing Opening Valve. Journal of Energy Resources Technology. 2021;143(5):051301.

[10]. Imamalipour A, Nazari H, Esmailzadeh M. A Review on the geochemical distribution of rare earth elements (REE) in coal, with a view on Iran's coal. New Findings in Applied Geology. 2020;14(28):62-9.

[11]. Yousefi GR, Kaviri SM, Latify MA, Rahmati I. Electricity industry restructuring in Iran. Energy Policy. 2017;108:212-26.

[12]. Stamford L, Azapagic A. Life cycle sustainability assessment of electricity options for the UK. International Journal of Energy Research. 2012;36(14):1263-90.

[13]. Hondo H. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy. 2005;30(11-12):2042-56.

[14]. Kannan R, Leong K, Osman R, Ho H. Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2007;11(4):702-15.

[15]. Treyer K, Bauer C. The environmental footprint of UAE′ s electricity sector: combining life cycle assessment and scenario modeling. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;55:1234-47.

[16]. Ozcan M. Estimation of Turkey′ s GHG emissions from electricity generation by fuel types. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;53:832-40.

[17]. Atilgan B, Azapagic A. An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. Energy Policy. 2016;93:168-86.

[18]. Şengül H, Bayrak F, Köksal MA, Ünver B. A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data. Journal of Cleaner Production. 2016;129:478-90.

[19]. Abolghasemi M, Mousavi Reineh M, Yousefi H. Carbon footprint and its calculation methods with emphasis on electricity generation from renewable and fossil sources. Journal of Renewable and Innovative Energies. 2019;6(2):31-41.

[20]. Dalir F, Motlagh MS, Ashrafi K. A dynamic quasi comprehensive model for determining the carbon footprint of fossil fuel electricity: a case study of Iran. Journal of Cleaner Production. 2018;188:362-70.

[21]. Zheng X, Streimikiene D, Balezentis T, Mardani A, Cavallaro F, Liao H. A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players. Journal of Cleaner Production. 2019;234:1113-33.

[22]. Ye J. Fault diagnoses of steam turbine using the exponential similarity measure of neutrosophic numbers. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2016;30(4):1927-34.

[23]. Walsh PP, Fletcher P. Gas turbine performance: John Wiley & Sons; 2004.

[24]. Vozka P, Kilaz G. A review of aviation turbine fuel chemical composition-property relations. Fuel. 2020;268:117391.

[25]. Lovell H, Liverman D. Understanding carbon offset technologies. New Political Economy. 2010;15(2):255-73.

[26]. Murthy KR, Raju MR. Electrical energy loss in rural distribution feeders-a case study. Power. 2007;12(12.31):14.1.

[27]. Hammond G. Time to give due weight to the'carbon footprint'issue. Nature. 2007;445(7125):256-.

[28]. Kim I-W, Jin S-H, Kim T-W, Kim I-T, Yeo Y-K. A study on reliability analysis and quantitative risk analysis for liquefied petroleum gas station. Journal of the Korean Institute of Gas. 2001;5(4):40-8.

[29]. Khorramdel S, Nassiri Mahallati M, Soltan Ahmadi A, Hooshmand M, Mostafavi MJ. Evaluation of Carbon Footprint for Saffron

Production Systems in Khorasan Provinces. Saffron agronomy and technology. 2021.

[30]. ABBASI F, MALBOUSI S, Babaeian I, Asmari M, Borhani R. Climate change prediction of south Khorasan province during 2010-2039 by using statistical downscaling of ECHO-G data. 2010.