-- Iranian Energy Economics------
Spting ٢٠٢٢, ٤٢(١١), ٤٧-٧٤
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/١٠,٢٢٠٥٤/jiee.٢٠٢٢.٦٨٧٢٥.١٩٣٧

ATU PRESS

Original Research
Received: ٢٧/Jun/٢٠٢٢
Accepted: ٤/Dec/٢٠٢٢
ISSN: ٢٤٢٣-٥٩٥٤
eISSN: ٢٤٧٢-٩٤٣٧

Estimation of Levelized Costs of Electricity Generation in Renewable and Fossil Power Plants

Neda Rezaei Ph.D. Student, Department of Environmental Management, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Rokhshad Hejazi* Assistant Professor, Department of Environmental Management, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Hossein Yousefi ١. Associate Professor, Faculty of Modern Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
٢. Associate Professor, Department of Environmental Management, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

The existence of a comprehensive model that enables the calculation of the real price of electricity production along with its environmental costs is one of the most important analytical tools in energy economics. It is now different from when virtual water costs and other environmental costs of power generation are taken into account. In this article, information from ٥٦ power plants across the country was used. In this paper, an algorithm for calculating the Levelized Cost of Electricity (LCOE) is presented. Among these, common technologies in the production sector, including heating, gas, combined cycle, wind, and photovoltaic power plants, have been studied from an economic perspective and the results of calculating their cost price have been presented. The results show that the highest costs are related to electricity generation using gas technology (١٨,٨٦ cents per kilowatt hour with subsidized fuel and ٣٥,٩٨ cents per kilowatt hour with exported fuel) and the lowest cost of generating electricity through a wind farm is ٦,٥٩ cents per kilowatt hour. In the calculations, the cost of fuel in the form of subsidies and exports and the cost of virtual water in the production process are also considered. One of the reasons for the slow growth of renewable energy development is that the fuel price of gas and oil for power plants in Iran was not realistic despite the fuel subsidy, so electricity production in thermal power plants is cost-effective and electricity production from renewable energies such as wind and photovoltaic power plants in a superficial view has no economic justification.

Keywords: Electricity, Renewable Power Plant, Fossil Power Plant, Environmental Costs, Levelized Cost

* Corresponding Author: rohk.hejazi@gmail.com
How to Cite: Rezaei, N., Hejazi, R., Yousefi, H. (٢٠٢٢). Estimation of levelized Costs of Electricity Generation in Renewable and Fossil Power Plants. Iranian Energy Economics, ٤٢ (١١), ٧٧-٤٤.

JEL Classification: D۴۰ , Q۲۱ , Q۳۱ , Q۳۳, Q۴۱ , Q۵۱

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

-- پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران ---------
دوره ۱۱، شماره ۴۲، بهار ۱۴۰۱، ۴۷-۷۴
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/۱۰,۲۲۰۵۴/jiee.۲۰۲۲,۶۸۷۲۵,۱۹۳۷

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳
ISSN: ۲۴۲۳-۵۹۵۴
eISSN: ۲۴۷۶-۶۴۳۷

برآورد هزینه‌های هم‌تراز شده تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های تجدیدپذیر و فسیلی[۱]

ندا رضایی دانشجوی دکتری گروه مدیریت محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

رخشاد حجازی* استادیار گروه مدیریت محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

حسین یوسفی ۱-دانشیار گروه مدیریت محیط زیست، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، ۲- دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، ایران

چکیده

رشد سریع اقتصادی در کشورهای در حال توسعه و رشد مداوم در کشورهای صنعتی، باعث افزایش تقاضای انرژی گشته است. وجود یک روش و الگوی جامع که بتواند قیمت واقعی انرژی را همراه با جزئیات آن محاسبه و تحلیل نماید، از مهمترین ابزارهای تحلیلی در اقتصاد انرژی است که به‌ویژه در صنعت برق یکی از مهمترین نیازها می‌باشد. در این مقاله روشی برای محاسبه هزینه هم‌تراز شده برق ارائه شده است. در صورت محاسبه قیمت واقعی تولید برق شاهد رونق انرژی‌های تجدیدپذیر خواهیم بود زیرا قیمت تمام شده برق، در حال حاضر متفاوت از زمانی است که هزینه آب مجازی و سایر هزینه‌های محیط زیستی تولید برق در نظر گرفته شود. در این مقاله فناوری‌های متداول در بخش تولید، شامل نیروگاه‌های بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، بادی و فتوولتائیک از منظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج محاسبه قیمت تمام‌شده آنها ارائه شده است. درخصوص آب مجازی که بخشی از هزینه هم‌تراز شده برق در نظر گرفته می‌شود نتایج نشان می‌دهند که به طور متوسط مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی برابر با ۲ میلیون متر مکعب و در نیروگاه فتوولتائیک و بادی ۳ هزار مترمکعب در سال می‌باشد. همچنین بیشترین مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به ترتیب: بخاری، سیکل ترکیبی، گازی، فتوولتادیک و بادی است. بیشترین هزینه مربوط به تولید برق با استفاده از نیروگاه‌های گازی و کمترین هزینه مربوط به تولید برق از طریق نیروگاه بادی می‌باشد. یارانه سوخت سبب غیر واقعی شدن قیمت سوخت گاز و نفت نیروگاهی در ایران شده است که تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی مقرون به صرفه کرده و رشد انرژی‌های تجدیدپذیر را کُند و تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک را غیر اقتصادی کرده است.

کلیدواژه‌ها: انرژی الکتریکی، نیروگاه تجدیدپذیر، نیروگاه فسیلی، هزینه‌های محیط زیستی، هزینه هم‌تراز شده

---

۱. مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت محیط زیست دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال است.

* نویسنده مسئول: rohk.hejazi@gmail.com

طبقه‌بندی JEL: D۴۰ , Q۲۱ , Q۳۱ , Q۳۳ , Q٤۱ , Q٥۱

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱. مقدمه

رشد سریع اقتصادی در کشورهای در حال توسعه و رشد مداوم در کشورهای صنعتی، باعث افزایش تقاضای انرژی گشته است. تنوع فناوری‌های موجود به همراه محدودیت‌های فنی و اقتصادی موجب شده تا برنامه‌ریزی فنی - اقتصادی تولید برق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود. روش‌های متفاوت تولید برق (فسیلی و تجدیدپذیر) موجب شده تا تصمیم‌گیری از میان کلیه انتخاب‌های ممکن، نیازمند مطالعات دقیق و همه جانبه باشد تا ترکیب مناسب از روش‌های تولید برق با کمترین هزینه به همراه عرضه مناسب و مطمئن برق را فراهم سازد. ازاین‌رو لازم است بهای تمام شده برق تولیدی توسط فناوری‌های مختلف تعیین گردد تا بتواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری مدیران برای برنامه‌ریزی در جهت رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده و نظارت و کنترل بر آنها استفاده شود. هدف این مقاله مطالعه و مقایسه هزینه تولید هر کیلووات ساعت برق از طریق فناوری‌های فسیلی و نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور ایران است.

وجود یک روش و الگوی جامع که بتواند قیمت واقعی انرژی را همراه با جزئیات آن محاسبه و تحلیل نماید، از مهمترین ابزارهای تحلیلی در اقتصاد انرژی است که به‌ویژه در صنعت برق یکی از مهمترین نیازها می‌باشد (فوئنتس[۱]، ۲۰۲۰). در این مقاله روشی برای محاسبه هزینه هم‌تراز شده برق[۲] ارائه شده است. براساس مطالعات و پروژه‌های انجام‌شده با روش هزینه هم‌تراز شده برق، از این شاخص برای مقایسه رقابت‌پذیری فناوری‌های مختلف تولید برق استفاده شده است لذا این روش محدود به فناوری خاصی نبوده و می‌توان از آن برای مقایسه هزینه‌های نیروگاه‌های بخاری، گازی، سیکل ترکیبی با نیروگاه‌های تجدیدپذیر نظیر بادی، خورشیدی، زمین گرمایی و ... استفاده نمود (راث و امبز[۳]، ۲۰۰۴) (کوئک و همکاران[۴]، ۲۰۱۹).

محاسبه هزینه‌های محیط زیستی این صنعت از موضوعات نو به‌شمار می‌رود و مطالعات اندکی در این زمینه انجام گرفته است. البته باید متذکر شد که هزینه‌های محیط

---

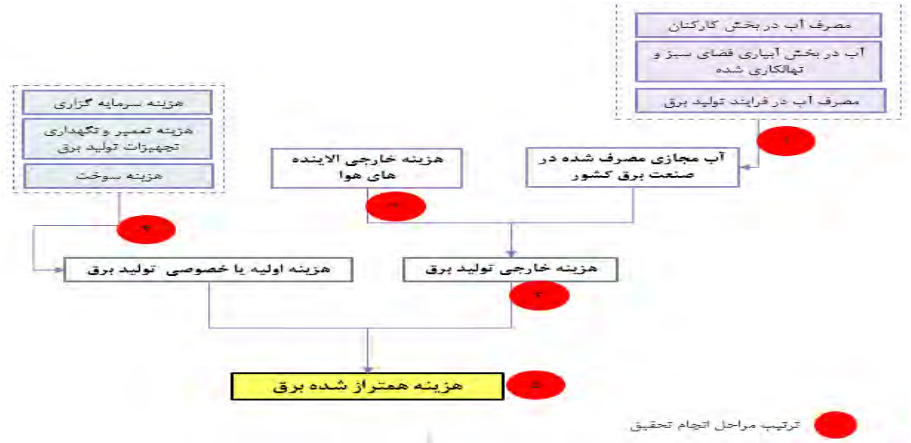
۱. fuentes
۲. levelized cost of electricity (LCOE)
۳. roth and Ambs
٤. quek

زیستی شامل جنبه‌های متفاوتی است و برآورد همهٔ جنبه‌ها با هم مطالعه را با پیچیدگی روبه‌رو می‌سازد. محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی اعم از هزینه‌های گازهای آلاینده ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و هزینه آب مجازی تولید برق برای تعیین قیمت واقعی تمام‌شده برق در این بخش بسیار مهم است بنابراین محاسبه مصرف آب پنهان و قیمت آن و هزینه‌های زیست‌محیطی از ضرورت این بخش و انجام تحقیق است. به عبارتی دیگر در این تحقیق تلاش بر این است که میزان مصرف آب مجازی انواع نیروگاه‌ها برحسب لیتر بر کیلووات ساعت محاسبه گردد و در ادامه نیز هزینه‌های ناشی از آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌ها به عنوان یک هزینه خارجی در قیمت تمام‌شده برق ملحوظ گردد.

با توجه به شرایط خاص صنعت برق و در نظر گرفتن میزان دی‌اکسیدکربن انتشاریافته در طول فرایند تولید برق به عنوان ابزاری در جهت سنجش میزان تأثیر تولید انرژی برق در انتشار گازهای گلخانه‌ای در این تحقیق استفاده شد. تاکنون در کشور ایران میزان دی‌اکسیدکربن انتشار یافته در طول فرآیند تولید برآورد نشده است و در این مقاله برای اولین‌بار این تحقیق صورت گرفته است.

تاکنون حول محور تولید برق از نیروگاه‌های فسیلی (ذغال سنگ، گاز و نفت) مطالعاتی صورت گرفته، با توجه به تغییر سیاست کشورها به سمت توسعه بیشتر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر برق آبی، خورشیدی، بادی نیاز بیشتری بر مطالعه مزایای محیط زیستی رقابتی انرژی‌های تجدیدپذیر و معایب محیط زیستی نیروگاه‌های فسیلی حس می‌شود. درنتیجه در این تحقیق به بررسی هزینه‌های محیط زیستی ناشی از انتشار گازهای آلاینده و هزینه‌های ناشی از آب مجازی و قیمت تمام شده برق از انواع نیروگاه‌ها در این صنعت پرداخته می‌شود تا معایب و مزایای محیط زیستی و اقتصادی نیروگاه‌های مختلف مشخص گردد. با توجه به پیچیدگی و چند شاخه بودن فرایند محاسبه هزینه هم‌تراز شده تولید برق در انواع نیروگاه‌ها چهارچوب کلی انجام پژوهش به صورت خلاصه در شکل ۱ ارائه شده است.

شکل ۲. چهارچوب کلی انجام تحقیق



منبع: یافته‌های تحقیق

به منظور پوشش هدف مقاله، این روند طی شده است، در بخش دوم پیشینه پژوهش، در بخش سوم مبانی نظری، در بخش چهارم روش تحقیق مطرح شده است. سپس در بخش پنجم یافته‌های حاصل از تحقیق آمده و درنهایت در بخش ششم بحث و نتیجه‌گیری مزرح شده است.

۲. پیشینه پژوهش

موسوی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش هزینه هم‌تراز شده به بررسی هزینه‌های برق از نیروگاه‌های حرارتی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن قیمت جهانی سوخت و هزینه خارجی گازهای آلاینده هوا، انرژی باد می‌تواند به اندازه نیروگاه‌های فسیلی رقابتی باشد. نتایج این مقاله حاکی از آن است که قانون هدفمندی یارانه‌ها می‌تواند تأثیر چشمگیری بر توسعه صنعت باد ایران در آینده بگذارد.

اسدی و همکاران (۱۳۹۵) در مقاله‌ای پس از بیان ظرفیت‌های کشور در زمینه گسترش انرژی زمین گرمایی به مقایسه هزینه‌های تولید برق با روش هزینه هم‌تراز شده برق می‌پردازند. در این تحقیق به یارانه بالای قیمت سوخت نیروگاهی و لحاظ نشدن هزینه‌های آثار خارجی در هزینه نهایی برق اشاره شده است. مقایسه هزینه تمام شده برق مفروض بر قیمت صادراتی سوخت و هزینه آثار خارجی نشان می‌دهد که ضریب ظرفیت بالا، عدم نیاز به سوخت فسیلی و هزینه آلایندگی ناچیز، نیروگاه‌های زمین گرمایی را با سایر نیروگاه‌های

مرسوم در ایران رقابت‌پذیر می‌سازد، در حالی که مقایسه هزینه تمام شده برق مفروض بر قیمت فعلی سوخت و عدم ملاحظات زیست محیطی نشان می‌دهد که نیروگاه زمین گرمایی در مقایسه با سایر نیروگاه‌های متداول در اولویت آخر اقتصادی قرار دارد. این پژوهش پیشنهاد می‌دهد که آزادسازی قیمت تمام شده انرژی و لحاظ هزینه آثار خارجی، اثر قابل توجهی بر توسعه صنعت برق زمین گرمایی در ایران خواهد داشت و امکان صادرات بیشتر سوخت را نیز فراهم می‌کند.

موسوی رینه[۱] و همکاران (۲۰۲۱) در مقاله خود به محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی تولید برق و تحلیل تأثیر هزینه‌های زیست‌محیطی بر قیمت تولید برق پرداختند و هزینه انتشار سوخت فسیلی و هزینه‌های آب مجازی در توربین بخار، توربین گازی، نیروگاه‌های CCGT به ترتیب ۳/۰۳، ۲/۴۴ و ۱/۲۴ سنت در هر کیلووات ساعت محاسبه کردند. همچنین به این نتیجه رسیدند که، تولید الکتریسیته ناشی از باد و فتوولتائیک، سالانه بیش از ۱۰ میلیون تن ذرات معلق وگازهای گلخانه‌ای را از انتشار در جو جلوگیری می‌کند.

رم و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله‌ای به بررسی تحلیل مقایسه‌ای هزینه‌های تولید برق از منابع تجدیدپذیر، سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای در کشورهای« جی ۲۰»[۲] برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ پرداختند. کمترین مقادیر هزینه هم‌تراز شده برق برای نیروگاه‌های بادی از ۱۶ تا ۹۰ یورو در مگاوات ساعت است. به طور کلی پشت‌بام خورشیدی عموماً پایین‌ترین هزینه هم‌تراز شده برق بعدی را از ۳۱ تا ۱۲۶ یورو در هر مگاوات ساعت ارائه می‌دهد. انرژی خورشیدی براساس هزینه هم‌تراز شده برق در مقیاس سودمندی از ۲۱ تا ۱۶۵ یورو در هر مگاوات ساعت بسیار رقابتی هستند.

با توجه به این موضوع که هزینه هم‌تراز شده دارای دو زیر مجموعهٔ هزینه‌های داخلی تولید برق و هزینه‌های خارجی تولید برق می‌باشد در ادامه به برخی از تحقیقات که در زمینه هزینه‌های خارجی تولید برق که شامل هزینه آب مجازی و هزینه خارجی آلاینده‌های تولیدی در فرایند تولید برق می‌باشد اشاره خواهد شد.

استرمکین و آلیسوکیت[۳] (۲۰۱۴) در مقالهٔ خود هزینه‌های خارجی تولید برق در لیتوانی را بررسی نمودند. ارزیابی هزینه‌های خارجی نشان داد سیاست انرژی آینده باید در جهت

---

۱. mousavi reineh
۲. G۲۰
۳. streimikiene and alisauskaite-seskiene

تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر با کمترین هزینه خارجی باشد. در این تحقیق مراحل تولید برق در چرخه زندگی فناوری‌های مختلف تولید برق درچارچوب زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۰ مورد مطالعه بوده است.

رابل و اسپادارو[۱] (۲۰۱۶) در مقاله‌ای با عنوان هزینه‌های خارجی انرژی، متدلوژی برای تجزیه و تحلیل آسیب‌های محیط‌زیستی در فرایند تولید برق را شرح می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد آلاینده‌های هوا به دلیل احتراق سوخت‌های فسیلی باعث خسارت قابل توجهی به محیط زیست می‌شود. در ادامه نتایج مربوط به هزینه خسارت به ازای هر کیلوگرم آلاینده ساطع شده را برای شرایط معمول در اروپا محاسبه کردند. همچنین همراه با داده‌های انتشار در هر کیلووات ساعت برق تولیدی، هزینه‌های محیط زیستی خسارت برق را محاسبه کردند.

چینیو استیل ویل[۲] (۲۰۲۰) در مقاله‌ای با عنوان تغییر شبکه تجارت آب مجازی شبکه برق اروپا بیان می‌کنند؛ در تولید انرژی، آب مصرف می‌شود، این آب از طریق سرد کردن نیروگاه‌های حرارتی و تبخیر پشت سدهای هیدروالکتریک قبل از جریان در سرتاسر شبکه برق فیزیکی همانند یک منبع تعبیه شده است. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷، تجارت آب مجازی از ۴۳ میلیون متر مکعب به ۴۹ میلیون متر مکعب افزایش یافته است. آلمان و فرانسه صادرکنندگان خالص بزرگ آب مجازی برای برق شدند. شکاف‌های قابل توجه آب برای برق در اروپا منجر به عدم قطعیت می‌شود. در شبکه برق اروپا یک شبکه تجارت آب مجازی برای کشورهایی که در پی متعادل کردن تقاضای برق‌شان هستند ایجاد شده است. در این مقاله بیشتر تجارت موقتی تغییرات آب مجازی از طریق آنالیز تغییرات سیاست‌های برق در سه کشور (ایتالیا، انگلستان و آلمان) و تأثیرات بعدی آن‌ها روی تجارت آب مجازی مورد تحلیل بوده است. در خاتمه در توسعه این شبکه مجازی آب، ما شکاف‌های مهم داده‌ها را شناسایی می‌کنیم که منجر به عدم قطعیت و ایجاد چالش‌هایی برای تصمیم‌گیری است. پیشنهاد اینکه یک برنامه داده جامع که اثرات انرژی روی منابع آب سرتاسر اروپا داشته باشد مورد نیاز است.

ژانگ[۳] و همکاران (۲۰۲۰) مقاله‌ای با عنوان تکامل جریان‌های آب مجازی در شبکه انتقال برق چین و نیروهای محرک آن را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که مراکز

---

۱. rabl and spadaro
۲. chini and stillwell
۳. Zhang et.al.

تولید برق به طور فزاینده‌ای در چین متفاوت است. در طول دوره مطالعه صادرات آب مجازی با تنش وزنی از استان‌های شمال غربی کم‌آب ۱۲۰ درصد افزایش یافته است. بهبود بهره‌وری آب در تولید برق حرارتی ۳۵ درصد از رشد بالقوه کل انتقال آب مجازی حجمی و بیش از ۵۰ درصد انتقالات با آب مجازی با تنش وزنی را جبران کرده است. اثر بهبود بهره‌وری آب از سال ۲۰۱۲ کاهش یافته است. با توجه به برنامه بلند پروازانه چین برای تقویت انتقال برق از غرب به شرق در آینده، افزایش نفوذ باد و انرژی فتوولتائیک خورشیدی در مخلوط برق در مناطق شمال غربی باید نقش بسیار مهمی را در تسکین تنش آبی در استان‌های اصلی صادرکننده برق بازی کند.

۳. مبانی نظری

اقتصاددان‌ها مدت‌هاست که فهمیده‌اند سیستم بازار خصوصی اثرات نامطلوبی بر محیط زیست و سلامتی بشر دارد. این اثرات نامطلوب شامل دودهای مضر، آب آلوده، گازهای آلاینده انتشاریافته از صنایع و کارگاه‌ها و غیره می‌باشد.[۱] (وانگ، ۲۰۱۹).

هزینه خارجی یک اثر بیرونی است که در اثر فعالیت اقتصادی و یا اجتماعی یک گروه از افراد یا شخص ایجاد می‌شود و روی گروه دیگر اثر می‌گذارد در حالی که این اثرات به طور کامل محاسبه نمی‌شوند و یا غرامتی به وسیله گروه اول پرداخت نمی‌شود (حسینیان و نظام الاسلامی، ۲۰۱۸). آلودگی که درنتیجه تولید برق ایجاد می‌شود یک هزینه خارجی است، به خاطر اینکه صدماتی را در ارتباط با آن روی جامعه و محیط زیست ایجاد می‌کند، بنابراین هزینه‌های محیط زیستی در اصل یک هزینه خارجی منفی و یک هزینه واقعی برای اعضای جامعه‌اند، که دارندگان نیروگاه‌ها آن‌ها را در محاسبات وارد نمی‌کنند (وانگ، ۲۰۱۹). به عبارتی دیگر در بخش انرژی کشور، هزینه‌های خارجی درواقع هزینه‌هایی هستند که به جامعه و محیط زیست در اثر تولید، انتقال، تبدیل و مصرف انرژی تحمیل می‌گردند ولی در قیمت کالا یا خدمات ملحوظ نمی‌گردند. از اثرات ناشی از فعالیت‌های مرتبط با تولید برق می‌توان به: اثرات گازهای خروجی نیروگاه‌ها در هوا بر سلامت انسان، کشاورزی، پوشش گیاهی و حیات وحش؛ افزایش سر و صدا و ارتعاش، تغییر در هیدرولوژی و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، اثرات سمی ناشی از نشت و تخلیه آلاینده‌ها، شوک حرارتی به موجودات آبزی، ازبین رفتن پوشش گیاهی، تغییر

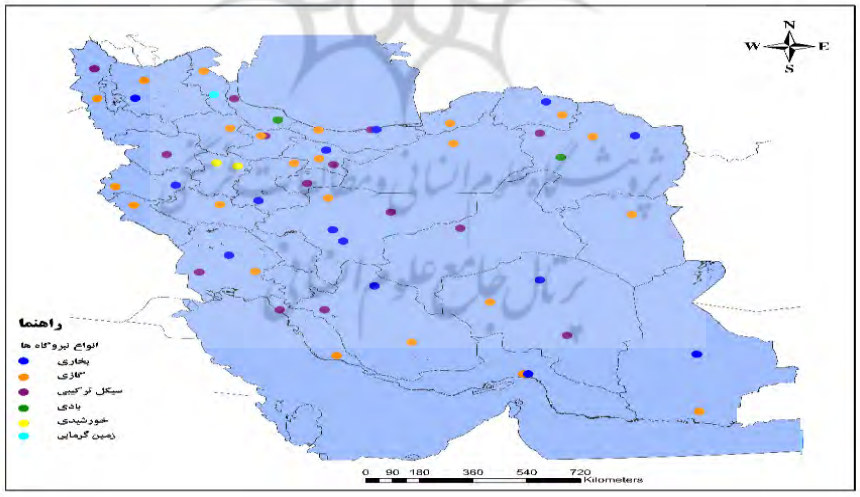
۱. Wang et al., ۲۰۱۹

الگـوی مصرف آب، اختلال و ترافیک محلی، بروز مخاطرات اتفاقی اشاره نمود. عدم توجه به هزینه‌های محیط زیستی تولید برق باعث ایجاد آثار مخرب بر منابع مورد استفاده می‌گردد و به عنوان نیرویی محرک، سیستم تولید برق را به سوی ناپایداری سوق می‌دهد (عباسپور، ۱۳۸۶). به نظر می‌رسد برآورد هزینه‌های هم‌تراز شده و لحاظ کردن آن در هزینه نهایی تولید برق گامی است به سوی شفاف‌سازی فرآیند قیمت‌گذاری کالا و خدمات در بخش انرژی که زمینه علمی لازم برای حرکت به سوی قیمت‌گذاری مبتنی بر بازار در مورد مصرف برق کشور فراهم می‌شود (عباسپور، ۱۳۸۶). وارد کردن هزینه‌های تولید برق رویکردی است که می‌توان آن را به عنوان شاخص مقایسه‌ای جهت ارزش‌گذاری اقتصادی تعیین کرده و هزینه‌های اجتماعی را منعکس کند (گلینگهام و استاک، ۲۰۱۸).[۱]

٤. روش تحقیق

در این تحقیق محاسبات بر روی ۵۵ نیروگاه بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، بادی و خورشیدی در کشور ایران انجام گرفت و سعی شد در هر استان حداقل یک نیروگاه به عنوان نمونه انتخاب گردد. اطلاعات و محل استقرار نیروگاه‌ها در شکل و جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۱. نقشه ایران به همراه موقعیت نیروگاه‌ها و لایه‌های اقلیمی



منبع: یافته‌های تحقیق

۱. Gillingham and Stock

جدول ۱. مشخصات نیروگاه‌های مورد مطالعه

نوع نیروگاه	نام	استان	نام	استان
بخاری	**سهند**	**آذربایجان شرقی**	**مس سرچشمه**	**کرمان**
	شهید منتظری	اصفهان	شهید رجایی	قزوین
	اسلام آباد	اصفهان	زرند	کرمان
	بعثت	تهران	بیستون	کرمانشاه
	طوس	خراسان رضوی	نکا (شهید سلیمی)	مازندران
	پتروشیمی خراسان	خراسان شمالی	شازند	مرکزی
	رامین	خوزستان	بندرعباس	هرمزگان
	ایرانشهر	سیستان و بلوچستان		
گازی	صوفیان	آذربایجان شرقی	چابهار	سیستان و بلوچستان
	ارومیه	آذربایجان غربی	افق ماهشهر	خوزستان
	سبلان	اردبیل	جهرم	فارس
	کاشان	اصفهان	سمنگان	کرمان
	پالایشگاه گاز ایلام	ایلام	اسلام‌آباد غرب	کرمانشاه
	عسلویه	بوشهر	علی آباد	گلستان
	ری	تهران	درود	لرستان
	شهید کاوه	خراسان جنوبی	نوشهر	مازندران
	فردوسی	خراسان رضوی	رودشور	مرکزی
	شیروان	خراسان شمالی	بندرعباس	هرمزگان
	سلطانیه	زنجان	شهید بسطامی	سمنان
سیکل ترکیبی	خوی	آذربایجان غربی	شوباد	کرمان
	زواره	اصفهان	پره سر	گیلان
	گناوه	بوشهر	نکا (شهید سلیمی)	مازندران
	شهدای پاکدشت	تهران	سرو (چادرملو)	یزد
	نیشابور	خراسان رضوی	شهید رجایی	قزوین
	آبادان	خوزستان	قم	قم
	کازرون	فارس	سنندج	کردستان
بادی	منجیل	گیلان	بینالود	خراسان رضوی
فتوولتاییک	خلیج فارس	همدان	سولار انرژی آرکا	کرمان

منبع: سایت وزارت نیرو

- روش هزینه هم‌تراز شده برق

هزینه هم‌ترازشده میزان ثابت درآمد به ازای فروش یک واحد محصول است که می‌تواند تمام مخارج پروژه را در طول عمر خدماتی پوشش دهد. هزینه یکنواخت یا هم‌تراز شده انرژی، روشی مبتنی بر محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تولید برق در کل دوره عمر پروژه می‌باشد که در آن تولید یک کیلووات ساعت برق از تقسیم ارزش فعلی کل هزینه‌های انجام شده بر کل برق تولیدی محاسبه می‌شود. براساس مطالعات و پروژه‌های انجام شده با روش هزینه هم‌تراز شده انرژی، از این شاخص برای مقایسه رقابت‌پذیری فناوری‌های مختلف تولید برق استفاده شده است لذا این روش محدود به فناوری خاصی نبوده و می‌توان از آن برای مقایسه هزینه‌های نیروگاه‌های بخاری، گازی، سیکل ترکیبی با نیروگاه‌های تجدیدپذیر نظیر بادی، خورشیدی، زمین گرمایی و ... استفاده نمود (آلبانی و همکاران[۱]، ۲۰۲۰) (کونک[۲] و همکاران، ۲۰۱۹).

رابطه ۱ تا ۴ معادله این شاخص را نشان می‌دهد.

$$LCOE = C_k + \left[\sum_{t=0}^{PL} \frac{C_{O\&M} \times (1+e_{O\&M})^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^{PL} \frac{C_{Fuel} \times (1+e_{Fuel})^t}{(1+r)^t}\right] \times \frac{r(1+r)^{PL}}{(1+r)^{PL}-1} + C_{Ec} \quad (1)$$

که در این معادله، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه سوخت از روابط ذیل حاصل می‌شود:

$$C_k = \frac{DR \times TPC(1+r)^{CL}}{HY \times CF} \quad (2)$$

$$C_{O\&M} = \frac{FOM}{HY \times CF} + VOM \quad (3)$$

$$C_{Fuel} = FC \times HR \quad (4)$$

CEc که همان هزینه‌های خارجی ناشی از آلاینده‌های گازی متصاعدشده از نیروگاه‌ها می‌باشد، در بخش بعدی به تفصیل شرح داده خواهد شد.

---

۱. albani
۲. quek

در معادلات بالا متغیرهایی موجود است که نیاز به شرح مفصل‌تری دارد، لذا جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. تعریف پارامترهای معادلات هزینه هم‌تراز شده

متغیر	واحد اندازه‌گیری	نام لاتین	نام فارسی
Ck	$/kWh	Capital Cost	هزینه سرمایه‌گذاری
DR	%	Depreciation Rate	نرخ استهلاک
TPC	$/kW	Total Plant Cost	کل هزینه ساخت
CL	Year	Construction Life	مدت زمان ساخت نیروگاه
r	%	Discount Rate	نرخ تنزیل
HY	Hours	Hours Per Year	تعداد ساعات دسترسی در سال
CF	%	Capacity Factor	ضریب ظرفیت
CO&M	$/kWh	Total O&M Cost	هزینه تعمیرات و نگهداری
eo&m	%	Escalation Rate Of O&M Cost	نوسانات هزینه تعمیات و نگهداری
FOM	$/kWyear	Total Fixed O&M Cost	هزینه ثابت تعمیرات و نگهداری
VOM	$/kWh	Total Variable O&M Cost	هزینه متغیر تعمیرات و نگهداری
HR	Btu/kWh	Heat Rate	نرخ حرارتی
PL	Year	Plant Life	طول عمر نیروگاه
FC	$/Btu	Fuel Cost	هزینه سوخت نیروگاه
eFuel	%	Escalation Rate Of Fuel cost	نوسانات هزینه سوخت
CEc	$/kWh	External Cost	هزینه اثرات خارجی
VED	$/gr	Value Of Environmental Damage	خسارت آلاینده
EF	gr/Btu	Emission Factor	شاخص انتشار
LCOE	$/kWh	Levelized Cost of Electricity	هزینه هم‌تراز شده برق

(موسوی[۱] و همکاران (۲۰۲۱))

در این تحقیق برای محاسبه ضریب ظرفیت[۲] نیروگاه‌های حرارتی از معادله ۵ استفاده خواهد شد. درواقع این فاکتور اساساً میزان عملکرد یک نیروگاه با حداکثر توان را اندازه‌گیری می‌کند (مورالس پدرازا[۳]، ۲۰۱۹).

$$CF = \frac{M}{rated\ capacity \times ۲٤ \times ۳٦٥} \qquad (۵)$$

۱. mousavi
۲. CF
۳. morales pedraza

M: تولید انرژی سالیانه نیروگاه (مگاوات ساعت)

Rated capacity: ظرفیت نامی نیروگاه (مگاوات)

محققان با استفاده از روش‌های متعددی به محاسبه میزان صدمات محیط زیستی تولید برق و هزینه‌های خارجی ناشی از آن پرداخته‌اند. در ادامه به معرفی روش مورد استفاده در این تحقیق پرداخته خواهد شد.

- محاسبه میزان آلاینده‌های تولیدی نیروگاه‌های برق

اندازه‌گیری غلظت گازهای خروجی از دودکش و اندازه‌گیری مقدار انتشار گاز خروجی از آن موجب تعیین میزان جرم آلاینده‌های خروجی در واحد زمان می‌شود. براساس قوانین استاندارد هوای پاک، بررسی انتشار آلاینده‌های خروجی از صنایع یکی از راههای تشخیص و اندازه‌گیری کیفیت هوا محسوب می‌شود. بدین‌منظور فاکتور انتشار مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفته و یک ابزار کاربردی و اساسی در دست مدیران جهت کنترل کیفیت هوا است. در نیروگاه‌ها فاکتور انتشار برحسب میزان جرم آلاینده‌های تولیدی یا گازهای حاصل از احتراق برحسب مقدار انرژی الکتریکی تولیدی بیان می‌شود. به طور کلی معادله تخمین انتشار به شرح زیر است (توانیر، ۱۳۹۶):

$$E = A \times Ef \times (۱ - \frac{ER}{۱۰۰}) \quad (۶)$$

در معادله بالا:

E برابر است با میزان انتشار آلاینده (مقدار جرم آلاینده)

A برابر است با نرخ فعالیت (میزان تولید واحد صنعتی، به طور مثال x کیلووات ساعت برق تولیدی)

Ef برابر است با فاکتور انتشار (مقدار جرم آلاینده منتشرشده به ازای میزان محصول تولیدی یا نرخ فعالیت)

ER برابر است با درصد کلی کاهش انتشار، در صورتی که از سیستم‌های کاهش آلاینده استفاده نشود این مقدار صفر است (درفشان و بیگ‌زاده، ۱۳۹۴) (نظری و همکاران، ۱۳۸۸).

در این مرحله پس از به دست آوردن مقدار جرم آلاینده (E)، هزینه خارجی ناشی از آلودگی هوا قابل محاسبه است. حال آثار کاهش کیفیت هوا باید به صورت کمّی بیان

گردد، طبق اطلاعات سازمان حفاظت محیط زیست امریکا[۱] هزینه انتشار هر تن آلاینده تعریف شده درنتیجه هزینه حذف و کنترل گاز آلاینده مورد نظر از ضرب مقدار آلاینده تولیدی در هزینه انتشار آن حاصل می‌شود. در این صورت آثار منفی فعالیت نیروگاه‌ها را می‌توان کمی نمود.

- محاسبه هزینه خارجی[۲]

در این رویکرد هزینه خارجی برابر است با میزان خسارت به صورت واحدهای فیزیکی ضرب در ارزش محیط زیست آسیب دیده به صورت دلار به ازای هر واحد برق تولیدی:

ارزش محیط زیست آسیب‌دیده به ازای هر واحد قصور × میزان قصور = هزینه خارجی

برای قابل مقایسه کردن میزان هزینه‌های خارجی تحمیل‌شده توسط فعالیت‌های مختلف باید آن را با تبدیل به یکاهای رایج قانونمند کرد. می‌توان آن واحد را کیلووات ساعت در نظر گرفت که نشان‌دهنده انتشار و توزیع خسارت است. تعیین دقیق میزان شاخص انتشار کاری بسیار دشوار می‌باشد و مقدار آن با توجه به قدمت و نوع نیروگاه، نوع سوخت مصرفی و کیفیت آن، سیستم‌های کنترل‌کننده و یا کاهنده آلاینده‌ها، موارد عملیاتی نیروگاه مانند نرخ حرارتی، دمای احتراق و ... متغیر است (وصفی اسفستانی و علیشیری, ۱۳۹۰). با این وجود تعیین شاخص انتشار به ازای هر واحد برق تولیدی لازم و ضروری می‌باشد. آلودگی هوا و تغییر اقلیم به عنوان اثر خارجی از احتراق سوخت‌های فسیلی نشان داده می‌شوند، عموماً گازهای انتشاریافته از نیروگاه‌ها (دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، منواکسید نیتروژن و سایر گازها) که عامل اصلی آلودگی هوا می‌باشند مد نظر قرار می‌گیرند. بنابراین برای نشان دادن میزان اثر خارجی نیروگاه‌هایی که از سوخت فسیلی استفاده می‌کنند می‌توان از معادله زیر استفاده کرد:

$$C_{External\ Cost}\left(\frac{\$}{kWh}\right) = Ef\left(\frac{g}{Btu}\right) \times HR\left(\frac{Btu}{kWh}\right) \times VED(\frac{\$}{g}) \qquad (۷)$$

که در معادله فوق:

Ef = میزان انتشار ناشی از مصرف سوخت

HR = نرخ حرارتی

VED= ارزش محیط زیست آسیب‌دیده (خسارت)

---

۱. EPA
۲. CEc

در ادامه به شیوه محاسبه مقدار آب مصرفی در تولید الکتریسیته پرداخته می‌شود تا در نهایت با لحاظ نمودن قیمت هر واحد آب هزینه خارجی تولید برق به صورت کامل و جامع در دسترس قرار گیرد.

- محاسبه آب مجازی در نیروگاه‌ها

میزان آب مصرفی در هر نیروگاه از طریق محاسبه آب ورودی به بخش‌های مختلف آن قابل محاسبه است، از آن جایی که بین مقدار آب مصرفی و میزان حرارت قابل دفع از نیروگاه‌ها ارتباط وجود دارد، می‌توان از روشی ساده، متفاوت و با دقت مناسب استفاده نمود و میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها را تخمین زد (چینی واستیلول[۱]، ۲۰۲۰). رابطهٔ محاسبه میزان آب مصرفی نیروگاه به شرح زیر است:

$$I = A(HR - B) + C \quad (۸)$$

در این رابطه I برحسب لیتر بر کیلووات ساعت $(\frac{L}{kWh})$ میزان آب مصرفی نیروگاه برحسب لیتر به ازای هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولیدی است.

پارامتر HR برحسب کیلوژول بر کیلووات ساعت $(\frac{kJ}{kWh})$ نشان‌دهنده نرخ حرارتی یا میزان حرارت ورودی مورد نیاز حاصل از سوخت نیروگاه برحسب کیلوژول، جهت تولید یک کیلووات توان الکتریکی به مدت یک ساعت می‌باشد. میان بازده نیروگاه و نرخ حرارتی نیروگاه‌ها رابطه معکوس برقرار است و بازده در هر نیروگاه یک مقدار مشخص و تعیین شده است، برای محاسبه HR از رابطه زیر می‌توان بهره جست (دلگادو و هرتزوگ[۲]، ۲۰۱۲):

$$Efficiency = {}^{۳۶۰۰}/_{HR} \quad (۹)$$

پارامتر B برحسب $(\frac{kJ}{kWh})$ کل نرخ حرارتی ورودی از سمت سوخت نیروگاه به جز نرخ حرارتی ورودی به سیستم خنک‌کننده را شامل می‌شود. پارامتر B نشان‌دهنده تمام جریان گرما خروجی از نیروگاه به جز جریان گرمایی است که توسط آب در بخش خنک‌کننده دفع می‌شود. همچنین پارامتر A برحسب $(\frac{L}{kJ})$ میزان آب مورد نیاز جهت دفع یک کیلوژول حرارت موجود در سیستم را نشان می‌دهد که این مقدار آب مورد نیاز به نوع سیستم خنک‌کننده وابسته است. درنهایت پارامتر C برحسب $\left(\frac{L}{kWh}\right)$ آب مورد نیاز در

۱. chini and stillwell
۲. delgado and herzog

سایر بخش‌های نیروگاه (شست‌وشوی گردوغبارها) به جز بخش خنک‌کننده را نشان می‌دهد که درواقع مقدار آن بسیار کمتر از آب مورد نیاز بخش خنک‌کننده می‌باشد. از آنجا که مقدار پارامتر C کم است، مشخص کردن مقدار دقیق آن کار دشواری است(دلگادو و هرتزوگ، ۲۰۱۲).

مقدار آب مصرف‌شده در هر نیروگاه با توجه به سیستم خنک‌کننده و نوع نیروگاه متفاوت می‌باشد. بازهٔ پارامترهای انواع نیروگاه‌ها برای محاسبه آب مصرفی آن‌ها در جداول۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳. پارامترهای مربوط به میزان آب مصرفی نیروگاه‌ها

نوع نیروگاه	HR نرخ حرارتی $(\frac{kJ}{kWh})$	B گرمای خروجی $(\frac{kJ}{kWh})$	C آب مورد نیاز در سایر بخش‌ها $(\frac{L}{kWh})$
نیروگاه گازی	۷۲۰۰	۵۱۹۵	۰/۰۲۵
نیروگاه بخاری	۹۰۰۰–۹۵۰۰	۵۶۵۰	۰/۱۵

منبع: (دلگادو و هرتزوگ، ۲۰۱۲)

جدول ٤. پارامتر مربوط به میزان آب مصرفی سیستم‌های خنک‌کننده

نوع سیستم خنک‌کننده	A آب برداشتی $(\frac{L}{kJ})$	A آب مصرفی $(\frac{L}{kJ})$
گردش باز آبی	۰/۰۲۲–۰/۰۳٤	۰/۰۰۰٤۵
برج تر	۰/۰۰۰۳٤–۰/۷۷۰۰۰	۰/۰۰۰٤۲
برج خشک	۰	۰

منبع: (دلگادو و هرتزوگ، ۲۰۱۲)

همچنین می‌توان از راندمان هر نوع نیروگاه نیز برای محاسبه آب مصرفی آن بهره جست. واضح است که هرچه راندمان نیروگاه بیشتر شود میزان حرارت تلف شده در آن کمتر می‌باشد. بنابراین می‌توان بازه آب مصرفی را به بازه راندمان هر نوع نیروگاه ارتباط داد. به بیان ساده اگر رابطه بیان شده به صورت تقریبی، خطی در نظر گرفته شود، کمترین راندمان با بیشترین میزان مصرف آب و بیشترین راندمان با کمترین میزان مصرف آب متناظر خواهد بود همچنین باید به این نکته توجه داشت که مقایسه راندمان نیروگاه‌ها با مقدار آب مصرفی در هر نوع نیروگاه انجام می‌گیرد برای مثال در مقایسه نیروگاه‌های بخاری هرچه راندمان نیروگاه افزایش می‌یابد میزان مصرف آب نیروگاه کاهش پیدا می‌کند.

میزان مصرف آب نیروگاهی با راندمان η از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

معادله ۱۰
$$I = I_{max} + \frac{I_{min} - I_{max}}{\eta_{max} - \eta_{min}} \times (\eta - \eta_{min})$$

با توجه به داده‌ها و اطلاعات در دسترس با استفاده از روش هزینه هم‌تراز شده برق و هزینه اثرات خارجی[۱] می‌توان هزینه اجتماعی تولید برق از فناوری‌های مختلف را محاسبه نمود و همچنین تأثیر هزینه‌های خارجی و هزینه‌های ناشی از آب مجازی تولید برق را بر قیمت تمام‌شده برق در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار داد.

۵. یافته‌های تحقیق

با توجه به عنوان مقاله که در ارتباط با برآورد هزینه‌های هم‌تراز شده تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های تجدیدپذیر و فسیلی می‌باشد مراحل رسیدن به هدف اصلی محققین که هزینه هم‌تراز شده تولید برق می‌باشد در چندین مرحله به شرح ذیل بررسی می‌شود.

- مرحله اول: در این مرحله به بررسی وضعیت آب مجازی در انواع انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) و تجدیدناپذیر (نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی) پرداخته می‌شود.
- مرحله دوم: سپس به بررسی هزینه‌های خارجی آلاینده‌های هوا در فرایند تولید انرژی الکتریکی در انواع مختلف نیروگاه‌ها پرداخته خواهد شد.
- مرحله سوم: در مرحله سوم هزینه‌های محیط زیستی ناشی از انتشار گازهای آلاینده و نیز هزینه‌های ناشی از آب مجازی در خلل تولید برق محاسبه می‌شود.
- مرحله چهارم: به کمک اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده از نیروگاه‌ها، هزینه خصوصی یا اولیه تولید برق در نیروگاه‌های مورد بررسی مورد محاسبه قرار می‌گیرد.
- مرحله پنجم: در راستای مراحل قبل تخمین هزینه واقعی تمام‌شده هر کیلووات ساعت برق تولید شده در این مرحله محاسبه می‌شود. این هزینه هم‌تراز شده تولید انرژی الکتریکی، با توجه به نوع تکنولوژی و منابع مصرفی متفاوت است. روش‌های متمایز تولید برق هزینه‌های متفاوتی دارند. هزینه‌ها شامل سرمایه اولیه و هزینه‌های بهره‌برداری مداوم، سوخت و نگهداری و همچنین هزینه‌های راه‌اندازی و رفع هرگونه آسیب محیطی است.[۲]

---

۱. CEc
۲. OEC, ۲۰۱۵; Ouyang and Lin, ۲۰۱۴

۱-۵. میزان آب مجازی

با توجه به میزان آب مصرفی در هر بخش و تعرفه قیمت آب و میزان تولید برق یک نیروگاه در یک سال، می‌توان هزینه آب مجازی را محاسبه نمود.

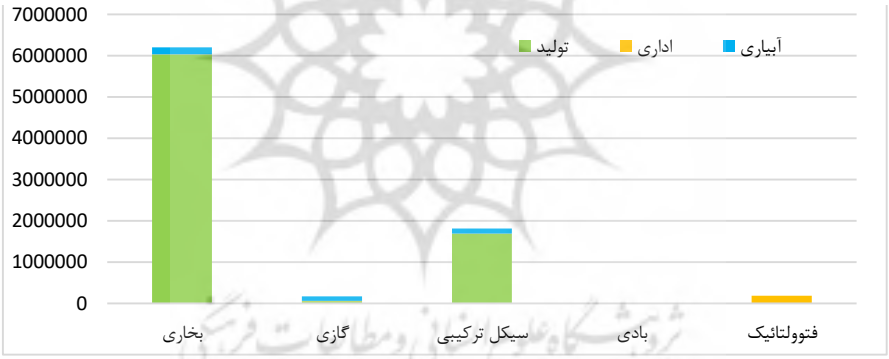
جدول ۵ و نمودار ۳ مقادیر مصرف در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد. میانگین مصرف آب در نیروگاه‌های نمونه برای هر بخش نوشته شده است.

جدول ۵. میزان آب مجازی در انواع نیروگاه‌ها در بخش‌های مختلف برحسب متر مکعب در سال

نوع نیروگاه	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	بادی	فتوولتائیک
فرآیند تولید	٦٠٢٣٢٩٠	٥٤٠٠٠	١٦٨٦٨٢١	٠	٩٤٩
اداری	٨٠٢٦	٥٨٥٥	٥٨٩٩	٣٤٥٣	١٨٧٦٤٢
آبیاری فضای مشجر	١٧٢٢٣٨	١٠٩٠٥٠	١١٨٩٣١	٠	٠
مجموع	٦٢٠٣٥٥٣	١٦٨٩٠٥	١٨١١٦٥١	٣٤٥٣	١٨٨٥٩١

منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ۳. آب مجازی تولید برق در تمامی فرآیندهای نیروگاه (مترمکعب در سال)



منبع: یافته‌های تحقیق

میزان مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها تابع مشخصات فنی آن نیروگاه می‌باشد برای مثال در بخش فرآیند تولید برق میزان آب مصرفی تابع نوع نیروگاه است و حتی نوع سیستم خنک‌کننده در مصرف آب تأثیر به سزایی دارد، نیروگاه بخاری با اختلاف میانگین مصرف بالاتری نسبت به سایرین دارد. از بین ۱۵ نیروگاه بخاری ۵ نیروگاه اصفهان، بعثت، رامین، مس سرچشمه، زرند و بیستون دارای سیستم خنک‌کننده برج تر و نیروگاه‌های پتروشیمی خراسان، شهید سلیمی و بندرعباس از نوع گردش آب باز بوده‌اند. درنتیجه نوع سیستم خنک‌کننده موجب اختلاف شدید میانگین مصرف آب نیروگاه بخاری با سایرین

شده است. اگرچه سیستم خنک‌کننده یکبارگذر آب کمتری نسبت به برج تر مصرف می‌کند اما از حیث آلودگی حرارتی و تأثیراتی که با افزایش دمای آب به آبزیان وارد می‌کند نیز هزینه‌هایی به محیط زیست وارد می‌نماید که محاسبه ارزش آن خسارت مورد بحث این تحقیق نیست. مصرف آب در بخش اداری تابع تعداد نیروی انسانی یک مرکز و در بخش آبیاری تابع مساحت یک نیروگاه می‌باشد. لذا براساس نتایج به دست آمده کل مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به قرار جدول ۶ است:

بخاری > سیکل ترکیبی > گازی > فتوولتائیک > بادی

جدول ٦. آب مجازی انواع نیروگاه‌ها

نوع نیروگاه	آب مجازی
نیروگاه‌های بخاری با سیستم خنک‌کننده برج تر	۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت
نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یکبارگذر	۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت
نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده خشک	۰/۲ لیتر بر کیلووات ساعت
نیروگاه‌های گازی	۰/۰۲۵ لیتر بر کیلووات ساعت
نیروگاه‌های فتوولتائیک	۰/۰۷ لیتر بر کیلووات ساعت
نیروگاه بادی	۰/۰۲ لیتر بر کیلووات ساعت

منبع: یافته‌های تحقیق

همچنین در این تحقیق میزان آب مجازی مصرف‌شده به ازای هر کیلووات ساعت برق محاسبه گردید. نتایج نشان داد که میزان آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌های مختلف تابع نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک‌کننده آن می‌باشد. میزان مصرف آب مجازی برابر با ۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری با سیستم خنک‌کننده برج تر، ۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یکبارگذر، ۰/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده خشک، ۰/۰۲۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های گازی و ۰/۰۷ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های فتوولتائیک می‌باشد. به طور متوسط مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی برابر با ۲ میلیون متر مکعب و در نیروگاه فتوولتائیک و بادی ۳ هزار مترمکعب در سال می‌باشد. نتایج نشان داد که مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به این ترتیب است: بخاری > سیکل ترکیبی > گازی > فتوولتائیک > بادی

۲-۵. میزان انتشار آلاینده‌های گازی

هزینه خارجی حاصل از گازهای منتشر شده از نیروگاه با استفاده از معادلات بخش قبل و نیز اطلاعات موجود در جداول محاسبه گردید. لازم به ذکر است که قبل از شروع انجام محاسبات هزینه خارجی گازهای آلاینده، داده‌ها در پایگاه داده‌ها در محیط اکسل بررسی شدند و داده‌های پرت حذف شدند. در بین داده‌های مربوط نرخ حرارتی یا HR، نیروگاه بخاری پتروشیمی خراسان و سیکل ترکیبی قم به عنوان داده پرت شناسایی و حذف شدند. سپس برای سهولت در بیان نتایج محاسبات به بررسی فاصله میانگین و میانه پرداختیم، از آنجا که این فاصله بسیار ناچیز بود از میان شاخص‌های تمرکز، از میانگین استفاده شد، در نتیجه هزینه خارجی گازهای منتشر شده از هریک از نیروگاه‌ها را به صورت میانگینی برای هر نوع نیروگاه در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷. هزینه خارجی ناشی از گازهای آلاینده و گلخانه‌ای (سنت بر کیلووات ساعت)

نوع نیروگاه	NOx	SO۲	SO۳	CO	PM	CO۲	CH٤	C	مجموع
بخاری	۰/۲۵۵	۰/٤۹۷	*	۰/۰۲۲	۰/۰۳۹	۱۰/۱۵	۰/۰۰۱	۰/۳۳۳	۱۱/۳۰
گازی	۰/۲۲۹	۰/۰۵۱	*	۰/۰۰۱	۰/۱۲۷	۱٤/٤٦	۰/۰۰۲	۰/٤۷۳	۱۵/۳٤
سیکل ترکیبی	۰/۲۸٤	۰/۰۲۱	*	۰/۰۰۱	۰/۱۱۵	۱/۲	۰/۰۰۱	۰/۲۸۲	۱/۹۱
بادی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فتوولتائیک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طورکه از جدول بالا نیز قابل پیش‌بینی است، با توجه به فاکتور انتشار قابل توجهی که دی‌اکسیدکربن و کربن نسبت به سایرین دارند، عمده گازهای منتشرشده در اثر یک سال فعالیت نیروگاه‌های مورد مطالعه این دو گاز هستند.

۳-۵. هزینه‌های محیط زیستی تولید برق در انواع نیروگاه‌ها

به کمک محاسبات در دو بخش «آب مجازی» و «میزان انتشار آلاینده‌های گازی»، هزینه ناشی از آب مجازی و هزینه آلاینده‌های هوا در نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های تجدیدپذیر محاسبه شد و در جدول ۸ آورده شد.

جدول ۸. هزینه محیط زیستی تولید برق در انواع نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر (سنت بر کیلووات ساعت)

نوع نیروگاه	هزینه محیط زیستی تولید برق در انواع نیروگاه ها
بخاری	۱۱/۳۰۵۰۰۱۲
گازی	۱۵/۳٤۰۱٤۵
سیکل ترکیبی	۱/۹۱۱
بادی	۰/۰۰۰۰۱۸
فتوولتائیک	۰/۰۰۰۳۸

منبع: یافته‌های تحقیق

با توجه به نمودار مشخص می‌شود نیروگاه‌های بخاری بیشترین هزینه محیط زیستی را دارد و نیروگاه‌های تجدیدپذیر به ترتیب بادی، فتوولتایک و زمین گرمایی کمترین هزینه خارجی یا همان هزینه محیط زیستی را دارد.

٤-۵. هزینه‌های اولیه یا خصوصی

همان‌طورکه در بخش قبلی بیان شد هزینه‌های خصوصی شامل هزینه اولیه ساخت (طراحی، دریافت گواهینامه، نصب و ...)، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه سوخت می‌باشد. نتایج محاسبات انجام‌شده برای به دست آوردن هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری و هزینه سوخت فعلی و صادراتی در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹. هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری و سوخت (سنت بر کیلووات ساعت)

	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	بادی	فتوولتائیک
هزینه سرمایه‌گذاری	۱/۷٤	۲/۷٤	۱/۱٤	٤/۸۹	۸/۲۱
هزینه تعمیرات و نگهداری	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۱۵	۱/۹۸	۳/۲۷
هزینه سوخت (قیمت گاز فعلی)	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۲۲	۰	۰
هزینه سوخت (قیمت گاز صادراتی)	۹/٤۰	۱۲/۲۹	۹/۳۱	۰	۰

منبع: یافته‌های تحقیق

۵-۵. هزینه هم‌ترازشده برق[۱]

محاسبات و تخمین‌های مرتبط با هزینه هم‌ترازشده برق، مبتنی بر رویکرد میانگین هزینه در طول عمر متوسط است. در انجام محاسبات از ترکیب مفروضات عمومی و ویژگی‌های

۱. LCOE

نیروگاه‌های داخلی کشور ایران برای پارامترهای مختلف فنی و اقتصادی استفاده می‌شود. هزینه‌ها در محدوده فرآیند داخلی نیروگاه بررسی گردیده و هزینه‌های انتقال و توزیع را شامل نمی‌شود. در این تحقیق محاسبه انتشار گازهای آلاینده به هوا فقط در بخش احتراق سوخت در تولید برق بررسی شده و شامل انتشار در استخراج سوخت و سایر مراحل مانند توزیع و انتقال نمی‌باشد.

در این بخش قبل از اعلام نهایی مقادیر هزینه تمام‌شده برق با تکنولوژی‌های مختلف با استفاده از روش هزینه هم‌تراز شده برق، لازم است دو سناریو معرفی شده و هزینه تمام‌شده در این دو سناریو مورد بحث قرار گیرند.

- سناریو اول: محاسبه هزینه هم‌ترازشده برق با در نظر گرفتن قیمت سوخت یارانه‌ای (همان قیمتی که در حال حاضر نیروگاه‌ها براساس آن سوخت خریداری می‌کنند) و با در نظر گرفتن هزینه‌های محیط زیستی اعم از هزینه گازهای آلاینده و گلخانه‌ای و هزینه آب مجازی.
- سناریو دوم: محاسبه هزینه هم‌تراز شده برق با در نظر گرفتن قیمت سوخت صادراتی (همان قیمتی که اگر سوخت را صادر کنیم برای کشور درآمد به همراه خواهد داشت) و با در نظر گرفتن هزینه‌های محیط زیستی اعم از هزینه گازهای آلاینده و گلخانه‌ای و هزینه آب مجازی.

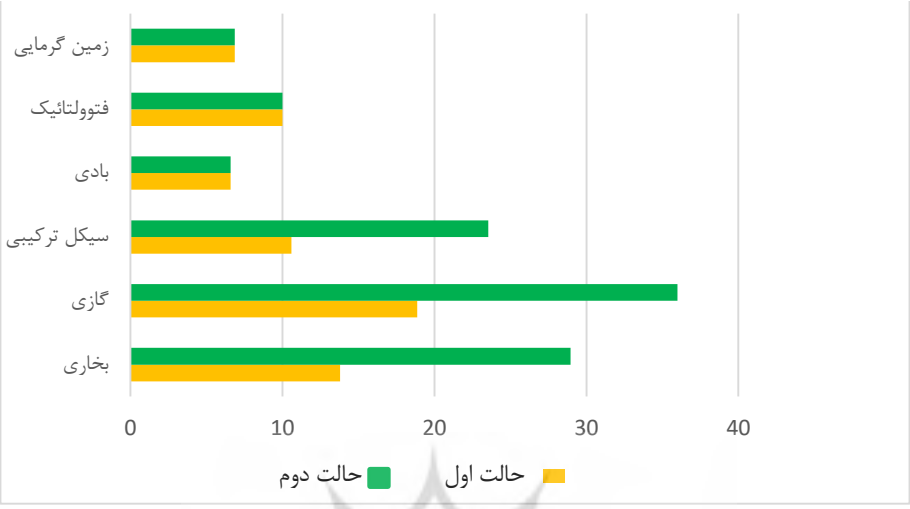
با استفاده از هزینه هم‌ترازشده برق هزینه هم‌ترازشده برق در تکنولوژی‌های مختلف تولید برق تحت سناریوهای مختلف محاسبه گردید، و نتایج آن در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. هزینه تولید برق در سناریوهای مختلف به تفکیک نیروگاه (سنت بر کیلووات ساعت)

	نوع نیروگاه	سناریو اول	سناریو دوم
LCOE	بخاری	۱۳/۷۸	۲۸/۹۶
	گازی	۱۸/۸٦	۳۵/۹۸
	سیکل ترکیبی	۱۰/۵۹	۲۳/۵٤
	بادی	٦/۵۹	٦/۵۹
	فتوولتائیک	۹/۹۹	۹/۹۹

منبع: یافته‌های تحقیق

نمودار ٤. مقایسه سناریو یک و دو در هزینه نهایی هم‌تراز شده سنت بر کیلووات ساعت



منبع: یافته‌های تحقیق

همان‌طورکه در جدول ۹ قابل مشاهده است، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیرات و نگهداری در نیروگاه‌های تجدیدپذیر نسبت به نیروگاه‌های حرارتی بسیار بالاتر است اما با مراجعه به جدول۱۰ می‌توان دریافت که نیروگاه‌های تجدیدپذیر مقرون به صرفه‌تر هستند چرا که هزینه سوخت ندارند و هزینه‌های خارجی در آن‌ها ناچیز و یا نزدیک به صفر است. هرچند که به دلیل ناچیز بودن قیمت پایه آب در کشور، هزینه آب مجازی ناچیز و برای برخی نمونه‌ها نزدیک به صفر محاسبه شده اما لازم به ذکر از که بخش عمده هزینه‌های خارجی مربوط به گازهای آلاینده منتشر شده از نیروگاه‌های حرارتی است.

٦. بحث و نتیجه‌گیری

اهمیت انرژی در دنیای کنونی باعث شده تا کشورهای مختلف در صدد توسعه منابع انرژی برآمده و علاوه بر سوخت‌های فسیلی که متداول‌ترین و آلوده‌کننده‌ترین منابع انرژی در دنیا می‌باشند، سهم منابع جدید تجدیدپذیر را نیز در سبد انرژی‌های خود افزایش دهند. ایران کشور وسیعی است که مکان‌های بادخیز فراوانی دارد. همچنین ایران در نواحی پرتابش واقع است و با وجود ۳۰۰ روز آفتابی و با استفاده از تجهیزات خورشیدی می‌توان انرژی قابل توجهی تولید کرد.

استفاده از این منابع می‌تواند در آینده‌ای نه چندان دور، بخش زیادی از نیازهای انرژی کشور را تأمین نماید. متأسفانه در سال‌های اخیر توجه چندانی به توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نشده است، دلیل این موضوع آن است که قیمت سوخت گاز و نفت نیروگاهی در ایران با وجود یارانه سوخت واقعی نبوده، تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک در نگاه سطحی و کلی توجیه اقتصادی ندارد. در تحقیق حاضر قیمت تمام شده تولید برق در انواع نیروگاه‌ها در دو سناریو مختلف مورد بررسی قرار گرفت، براساس سناریو اول و با احتساب قیمت پایه سوخت یارانه، نتایج نشان داد به دلیل بی‌توجهی به هزینه‌های محیط زیستی تولید برق از نیروگاه‌های فسیلی، هزینه نسبتاً پایین تولید برق در نیروگاه‌های فسیلی و نبود تکنولوژی‌های جدید برای تولید انرژی پاک امیدی به سمت افزایش سهم نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک در سبد انرژی کشور نخواهد داشت. اما در سناریو دوم با آزادسازی و واقعی شدن قیمت سوخت نیروگاه حرارتی، قیمت تمام‌شده برق تولید شده در این نیروگاه‌ها دیگر هیچ توجیه اقتصادی نداشته و استفاده از انرژی باد و خورشید به طور واضح قابل رقابت با دیگر منابع انرژی خواهد بود.

مزیت دیگر نیروگاه‌های تجدیدپذیر نسبت به نیروگاه‌های حرارتی نداشتن هزینه‌های محیط زیستی ناشی از تولید برق می‌باشد. نیروگاه‌های حرارتی با سوزاندن سوخت فسیلی در فرآیند تولید برق مقادیر قابل توجهی گاز آلاینده و گلخانه‌ای به هوا وارد می‌کنند و به کره زمین خسارت جبران‌ناپذیری وارد می‌نمایند. به طور مثال تولید برق در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب با انتشار حدود ۴/۲، ۱/۷ و ۲/۶ میلیون تن آلاینده در سال همراه است.

در تحقیقی که موسوی و همکاران انجام دادند با لحاظ نمودن هزینه‌های خارجی، قیمت تمام‌شده برق از نیروگاه بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب ۱۱، ۱۳ و ۹ سنت برکیلووات ساعت و از نیروگاه بادی ۹/۵ سنت بر کیلووات ساعت بوده است. که ۷۰، ۷۶ و ۷۸ درصد از هزینه نهایی متعلق به هزینه سوخت در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی بوده است و مصرف سوخت در نیروگاه بادی صفر می‌باشد. در این مقاله نیز با لحاظ نمودن هزینه‌های خارجی، قیمت تمام شده برق از نیروگاه بخاری، گازی و سیکل ترکیبی به ترتیب ۱۳/۷۸، ۱۸/۸۷ و ۱۰/۵۹ سنت بر کیلووات ساعت و از نیروگاه بادی ۶/۵۹ و از فتوولتائیک ۹/۹۹ سنت بر کیلووات ساعت برآورد شده است. که ۷۸، ۸۶ و ۸۸

درصد از هزینه نهایی متعلق به هزینه سوخت در نیروگاه‌های بخاری، گازی و سیکل ترکیبی بوده است و مصرف سوخت در نیروگاه بادی و فتوولتائیک نیز صفر می‌باشد. اسدی و همکاران در تحقیقی قیمت تمام شده برق از نیروگاه بخاری، گازی و سیکل ترکیبی را به ترتیب ۱۰، ۸ و ۶ سنت بر کیلووات ساعت تخمین زدند.

همچنین در این تحقیق میزان آب مجازی مصرف‌شده به ازای هر کیلووات ساعت برق محاسبه گردید. نتایج نشان داد که میزان آب مجازی مصرفی در نیروگاه‌های مختلف تابع نوع نیروگاه و نوع سیستم خنک‌کننده آن می‌باشد. میزان مصرف آب مجازی برابر با ۲/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری با سیستم خنک‌کننده برج تر، ۱/۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یکبارگذر، ۰/۲ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های بخاری و سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده خشک، ۰/۰۲۵ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های گازی و ۰/۰۷ لیتر بر کیلووات ساعت برای نیروگاه‌های فتوولتائیک می‌باشد. به طور متوسط مصرف آب در نیروگاه‌های حرارتی برابر با ۲ میلیون متر مکعب و در نیروگاه فتوولتائیک و بادی ۳ هزار متر مکعب در سال می‌باشد. نتایج نشان داد که مصرف آب در انواع نیروگاه‌ها به این ترتیب است: بخاری > سیکل ترکیبی > گازی > فتوولتائیک > بادی

مکنیک نیز مصرف آب در نیروگاه بادی را صفر و فتوولتائیک را ۰/۰۹ لیتر بر کیلووات ساعت و مقدار آب مصرفی در نیروگاه حرارتی با سیستم خنک‌کننده‌تر را ۲/۵ لیتر بر کیلووات ساعت و ۰/۹ لیتر بر کیلووات ساعت برای سیستم خنک‌کن یکبارگذر محاسبه نموده است.

جدول ۱۱. مقایسه نتایج تحقیقات دیگر محققیق با نتایج این تحقیق

نتایج در سایر تحقیق‌ها	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	بادی	فتوولتائیک
موسوی و همکاران، ۲۰۲۱	۱۱	۱۳	۹	۹/۵	–
اسدی و همکاران ۱۳۹۵	۱۰	۸	۶	–	–
رام و چیلد، ۲۰۱۸	–	۱۶/۵۹۰	۱۱/۰۳	–	۷
در تحقیق حاضر	۱۳/۷۸	۱۸/۸۶	۱۰/۵۹	۶/۵۶	۹/۹۹

منبع: یافته‌های تحقیق

با توجه به فرضیه‌ها و سؤالات این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که امکان جایگزینی ظرفیت‌های منابع تجدیدپذیر با سوخت‌های فسیلی در تولید برق این فرصت‌ها را فراهم می‌نماید تا بتوان ضمن توسعه منابع تجدیدپذیر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در تولید برق، اهداف دیگری از قبیل تنوع‌بخشی در سبد انرژی کشور و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش تولید انرژی و کاهش هزینه هم‌تراز شده تولید برق نیز محقق شوند. این مهم به سیاستگذاران این امکان را می‌دهد تا بتوانند از منابع تجدیدپذیر به عنوان ابزاری جهت دستیابی به اهداف کاهش انتشار و کاهش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی استفاده نمایند.

۷. تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

ORCID

Neda Rezaei https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۱-۰۳۵۰-۱۴۹۳

Rokhshad Hejazi https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۳-۲۶۷۶-۳۲۲۸

Hossein Yousefi https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۲-۶۳۷۲-۵۱۲۷

۸. منابع

اسدی، فریبا؛ کریم، محمدحسین و پوش هاری، مجید (۱۳۹۵). رقابت‌پذیری برق زمین گرمایی در مقایسه با روش‌های متداول تولید برق در ایران. *اقتصاد انرژی ایران (اقتصاد محیط زیست و انرژی)*، ۵(۱۸)، صفحات ۲۷-۱.

توانیر. (۱۳۹۶). *مطالعه موردی نگاشت نهادی نوآوری در صنعت برق کشور*.

درفشان، محسن و بیگ‌زاده، میلاد. (۱۳۹۴). بررسی میزان انتشار آلاینده‌های نیروگاه‌های کشور در سال ۱۳۹۳ و هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از آن. *اولین کنفرانس ملی علوم و مدیریت محیط زیست*.

عباسپور، مجید. (۱۳۸۶). *انرژی، محیط زیست و توسعه پایدار*. مؤسسه انتشارات علمی. دانشگاه صنعتی شریف.

نظری، سعید؛ سهرابی کاشانی، امیر؛ داوری، سوسن و دلاور مقدم، زهرا. (۱۳۸۸). تعیین ضریب انتشار گازهای احتراق از نیروگاه‌های سوخت فسیلی کشور و مقایسه آن با کشورهای آمریکای شمالی. *انرژی ایران*، شماره ۳۱.

وصفی اسفستانی، شهرام و علیشیری، حداد. (۱۳۹۰). ارزیابی هزینه‌های خارجی در نیروگاه‌ها. *دومین کنفرانس مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی*.

References

Abbaspour, Majid. (۱۳۸٦). *Energy, environment and sustainable development*. Sharif University of Technology, [In Persian]

Albani, A., Ibrahim, M. Z., Yong, K. H., Yusop, Z. M., Jusoh, M. A. and Ridzuan, A. R. (۲۰۲۰). The wind energy potential in Kudat Malaysia by considering the levelized cost of energy for combined wind turbine capacities. *Energy & Environment*, ۰۹۵۳۳۰۵X۲۰۹۳۷۰۰٦.

Asadi, Fariba, Karim, Mohammad Hossein and Pushhari, Majid. (۲۰۱۵). Competitiveness of geothermal electricity compared to conventional methods of electricity production in Iran. *Iranian Energy Economics Research Journal*, ٥(۱۸), ۱-۲۷ [In Persian].

Chini, C. M. and Stillwell, A. S. (۲۰۲۰). The changing virtual water trade network of the European electric grid. *Applied Energy*, ۲٦۰, ۱۱٤۱٥۱.

Darfashan, Mohsen and Beigzadeh, Milad. (۲۰۱٤). Investigating the amount of pollutant emissions from power plants in the country in ۲۰۱۳ and the resulting environmental costs. The first national conference of environmental science and management https://www.civilica.com/Paper-CMEI۰۱-CMEI۰۱_۰٥۲.html [In Persian].

Delgado, A. and Herzog, H. J. (۲۰۱۲). Simple model to help understand water use at power plants. Cambridge, *MA: Massachusetts Institute of Technology*.

Fuentes, S., Villafafila-Robles, R., Olivella-Rosell, P., Rull-Duran, J. and Galceran-Arellano, S. (۲۰۲۰). Transition to a greener Power Sector: Four different scopes on energy security. *Renewable Energy Focus*, ۳۳, ۲۳-۳٦.

Gillingham, K., & Stock, J. H. (۲۰۱۸). The cost of reducing greenhouse gas emissions. Journal of Economic Perspectives, ۳۲(٤), ٥۳-۷۲.

Hosseinian , S. M., & Nezamoleslami, R. (۲۰۱۸). Water footprint and virtual water assessment in cement industry: A case study in Iran. Journal of Cleaner Production, ۱۷۲, ۲٤٥٤-۲٤٦۳.

Morales Pedraza, J. (۲۰۱۹). Chapter ٤-Current Status and Perspective in the Use of Coal for Electricity Generation in the North America Region. Conventional Energy in North America, ۲۱۱-۲٥۷.

Mousavi Reineh , S. M., & Yousefi, H. (۲۰۲۱). Effects of the Environmental Cost of Electricity Generation, Considering the LCOE Model. Environmental Energy and Economic Research, ٦(۱), ۱-۱۱.

Mousavi, S. M., Ghanbarabadi, M. B., & Moghadam, N. B. (۲۰۱۲). The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran. Energy Policy, ٤۲, ٦٥۱-٦٥٦.

Nazari, Saeed, Sohrabi Kashani, Amir, Davari, Susan and Delavar Moghadam, Zahra. (۱۸۸۸). Determining the emission factor of combustion gases from the country's fossil fuel power plants and comparing it with North American countries. *Iran Energy*, Year ۱۲(۳), ۲٥-۳٦. [In Persian]

OECD, I. (۲۰۱۵). Projected Costs of Generating Electricity ۲۰۱۵. IEA OECD NEA.

Ouyang, X., & Lin, B. (۲۰۱٤). Levelized cost of electricity (LCOE) of renewable energies and required subsidies in China. Energy Policy, ۷۰, ٦٤-۷۳.

Quek, T. Y. A., Ee, W. L. A., Chen, W., & Ng, T. S. A. (۲۰۱۹). Environmental impacts of transitioning to renewable electricity for Singapore and the surrounding region: A life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, ۲۱٤, ۱-۱۱.

Rabl, A., & Spadaro, J. V. (۲۰۱٦). External costs of energy: how much is clean energy worth? Journal of Solar Energy Engineering, ۱۸۸(٤).

Ram, M., Child, M., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Lohrmann, A., & Breyer, C. (۲۰۱۸). A comparative analysis of electricity generation costs from renewable, fossil fuel and nuclear sources in G۲۰ countries for the period ۲۰۱۵-۲۰۳۰. Journal of Cleaner Production, ۱۹۹, ٦۸۷-٤۰٤.

Roth, I. F., & Ambs, L. L. (۲۰۰٤). Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing. *Energy*, ۲۹(۱۲–۱۵), ۲۱۲۵-۲۱٤٤.

Streimikiene, D., & Alisauskaite-Seskiene, I. (۲۰۱٤). External costs of electricity generation options in Lithuania. Renewable Energy, ٦٤, ۲۱۵-۲۲٤.

Tavanir (۲۰۱۹). Detailed statistics of the country's electricity industry. [In Persian]

Wang, C., Zhang, L., Zhou, P., Chang, Y., Zhou, D., Pang, M., & Yin, H. (۲۰۱۹). Assessing the environmental externalities for biomass- and coal-fired electricity generation in China: A supply chain perspective. Journal of Environmental Management, ۲٤٦, ۷۵۸-۷٦۷. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jenvman.۲۰۱٦,۰٦,۰۷۷

Wasfi Esfastani, Shahram and Alishiri, Hedah. (۱۳۹۰). Evaluation of external costs in power plants. The second energy consumption management and optimization conference. [In Persian]

Zhang, S., & Wang, Y. (۲۰۲۰). Estimating air pollution and health loss embodied in electricity transfers: An inter-provincial analysis in China. Science of The Total Environment, ۷۰۲, ۱۳٤۷۰۵.

استناد به این مقاله: رضایی، ندا؛ حجازی، رخشاد؛ یوسفی، حسین. (۱۴۰۱). برآورد هزینه‌های هم‌تراز شده تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های تجدیدپذیر و فسیلی، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۴۲ (۱۱)، ۴۷-۷۴.

Iranian Energy Economics is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ۴,۰ International License.