ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(12):835-848

Impact of Climate on Economic and Environmental Performance of Wind Turbine Based on Life Cycle Assessment Method

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Saifoddin Asl A.A.[1],
Moosavian S.F.[1]
Hajinezhad A.[1],

How to cite this article
Saifoddin Asl A A, Moosavian S F, Hajinezhad A. Impact of Climate on Economic and Environmental Performance of Wind Turbine Based on Life Cycle Assessment Method. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(12):835-848.

ABSTRACT

The increasing consumption of non-renewable energy sources such as oil and gas and reducing their reserves make it more necessary to pay attention to clean and renewable resources. In this situation, wind energy is known as one of the safest options for generating electrical energy. In this study, with the aim of evaluating the impact of climate change on the economic and environmental characteristics of wind turbines, numerical modeling was developed in MATLAB software. In order to evaluate the effects of the mentioned parameters as a case study, this numerical modeling for the parameters expressed in 4 cities of Iran, including Rasht, Tehran, Abadan, and Sanandaj, as the representatives of the main climates of Iran has been analyzed. According to the results of the economic point of view, which represents the Levelized cost of the energy production unit, Abadan was recognized as the most economical case with a Levelized cost of 1.04 $ per kilowatt-hour of energy. Also, the environmental aspect of the analysis, which is based on the life cycle assessment method, considering the amount of carbon dioxide produced during the system life cycle and its pricing based on penalty policies, Rasht with a mild climate and emissions of 156 kg. Carbon dioxide per year and the lowest fine cost (annual cost $ 2.26) showed the most suitable option among other cities.

Keywords Economic Analysis, Wind Turbine, Environmental Impact Assessment, Life Cycle Assessment Method

[1] Renewable Energies and Environment department, Faculty of New Sciences and Technologies, Tehran University, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Tehran University, Faculty of New Sciences and Technologies, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
hajinezhad@ut.ac.ir

Article History
Received: February 07, 2021
Accepted: August 13, 2021
ePublished: October 15, 2021

CITATION LINKS

[1] Energy and exergy analyses of various ... [2] Energy, exergy, exergoeconomic and ... [3] On the Performance Enhancement of the Three-Blade ... [4] Investigation of the load management and ... [5] The Wind Energy Potential Zoning using ... [6] The economics of wind energy ... [7] Numerical simulation of wind turbine in Manjil ... [8] Ducted wind turbine investigation in a wind tunnel ... [9] The Wind Energy Potential Zoning using GIS ... [10] Modeling, simulation, and optimization of ... [11] Wind turbines: fundamentals, technologies, ... [12] Evaluating economic uncertainty of municipal wind turbine ... [13] Domestic application of micro wind turbines ... [14] Multi-objective energy-cost design ... [15] The techno-economic potential of offshore wind energy ... [16] A methodological review to estimate ... [17] Energy, emissions and environmental impact ... [18] Life-cycle green-house gas emissions of ... [19] Analysis of the wind turbine noise emissions and ... [20] Future of renewable energies in Iran ... [21] An overview of renewable energies in Iran ... [22] Optical and thermal analysis of ... [23] Energy, exergy, environmental and economic analysis of ... [24] An Overview of Wind and Solar Energies in Iran ... [25] Multi criteria site selection model for ... [26] Köppen-Geiger climate classification of Iran and ... [27] Energy, exergy, economic and advanced and ... [28] An analytical expression for ... [29] Exergy analysis and optimisation ... [30] Wind Energy Systems [31] A Comparison of Off-Grid-Pumped ... [32] Energy, economic, and environmental ... [33] Novel approaches to exergy and economy ... [34] LCA of renewable energy for... [35] Valuing the greenhouse gas ... [36] Energy, exergy, environmental ... [37] Energy, exergy, economic and ... [38] The Copenhagen Accord: abatement ... [39] Exergy, exergoeconomic and enviroeconomic ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تاثیر اقلیم آب و هوایی بر عملکرد اقتصادی و زیست محیطی توربین بادی به روش ارزیابی چرخه حیات

امیرعلی سیف الدین اصل
گروه انرژی‌های تجدید پذیر و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
سید فرحان موسویان
گروه انرژی‌های تجدید پذیر و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
احمد حاجی نژاد*
گروه انرژی‌های تجدید پذیر و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

چکیده
افزایش روز افزون مصرف انرژی های تجدید ناپذیری همچون نفت و گاز و کاهش ذخایر آنان، لزوم توجه به منابع پاک و تجدیدپذیر را بیش از پیش ضروری می‌سازد. در این شرایط انرژی باد یکی از مطمئن ترین گزینه ها برای تولید انرژی الکتریکی شناخته می‌شود. در این پژوهش با هدف ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم های آب و هوایی بر مشخصه های اقتصادی و زیست محیطی توربین های بادی یک مدل‌سازی عددی در نرم افزار متلب، انجام گردید. جهت ارزیابی تاثیرات پارامتر های مذکور به عنوان یک مطالعه موردی این مدل‌سازی عددی برای پارامترهای بیان شده در ۴ شهر ایران شامل شهرهای رشت، تهران، آبادان و سنندج به عنوان نمایندگان اقلیم های اصلی آب و هوایی کشور ایران مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بر اساس نتایج دیدگاه اقتصادی که معرف هزینه تراز شده واحد انرژی تولید شده می‌باشد، شهر آبادان با هزینه تراز شده ۱/۰۴ دلار به ازای هر کیلووات ساعت انرژی به عنوان اقتصادی ترین شهر شناخته شد. همچنین جنبه زیست محیطی تحلیل که بر مبنای روش ارزیابی چرخه حیات بوده، با درنظرگیری مقدار کربن دی اکسید تولیدی در طول چرخه عمر سیستم و قیمت گذاری آن بر مبنای سیاست های جریمه ای، شهر رشت را با اقلیم معتدل مرطوب و با مقدار انتشار ۱۵۶ کیلوگرم کربن دی اکسید در سال و کمترین هزینه جریمه ای (هزینه سالیانه ۲/۲۶ دلار) در میان شهر های دیگر مناسب ترین گزینه نشان داد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل اقتصادی، توربین بادی، ارزیابی اثرات زیست محیطی، روش ارزیابی چرخه حیات

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۲
*نویسنده مسئول: hajinezhad@ut.ac.ir

۱- مقدمه
پیشرفت جوامع بشری از لحاظ اجتماعی، اقتصادی و صنعتی افزایش نیاز به انرژی را در ابعاد مختلف موجب شده است و این افزایش مصرف انرژی، افزایش نگرانی ها پیرامون آلودگی محیط زیست، تغییرات گسترده آب و هوا و کاهش ذخایر انرژی را به دنبال داشته است[1,2]. لذا ضرورت استفاده از سوخت ها و انرژی های پاک بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است تا ضمن تامین انرژی مورد نیاز، باعث کاهش انتشار گاز دی اکسیـــد کربـن (به عنوان یکی از مخرب ترین گاز های گلخانه ای) گردند[3,4].
در میان انواع گوناگون انرژی های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی، زمین گرمایی و جزر و مد، انرژی باد باتوجه به پایان ناپذیری، پایداری نسبی و دسترسی آسان مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است[5]. برای استفاده از انرژی باد مرسوم ترین روش استفاده از توربین های بادی میباشند که قابلیت تبدیل مستقیم انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی را دارند[6].
توربین های بادی به دو دسته کلی محور عمودی و محور افقی تقسیم بندی می شوند. توربین های محور افقی با توجه به ضریب توان و گشتاور بیشتری که نسبت به انواع توربین های محور عمودی دارند در سال های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند[7]. توان تولیدی توربین های محور افقی به شدت متاثر از شدت باد منطقه ایست که توربین در آن قرار دارد[8]. به همین دلیل انتخاب موقعییت جغرافیایی محل قرار گیری این توربین ها امری حیاتی به نظر میرسد. از طرفی هر منطقه جغرافیایی نیز دارای اقلیم آب و هوایی مشخصی است و این اقلیم با تعیین شرایط جوی نظیر سرعت و شدت باد، میزان رطوبت نسبی و ارتفاع از سطح دریا بر روی کارایی توربین موثر می باشد. بدین جهت بر اساس شرایط جغرافیایی و شدت و پتانسیل باد منطقه، لازم است از توربین مناسب و سازگار با شرایط محل استفاده گردد[9]. بطور کلی اقلیم های موجود در سطح دنیا به ۵ دسته ی اصلی: اقلیم های استوایی/گرمسیری، اقلیم های خشک، اقلیم های معتدل، اقلیم های قاره ای و اقلیم های قطبی تقسیم می‌گردند[10]. باتوجه به وجود اقلیم های مختلف با شرایط محیطی گوناگون، لزوم انجام مطالعاتی پیرامون تاثیر شرایط اقلیمی بر عملکرد اقتصادی و محیط زیستی توربین های بادی امری لازم به نظر میرسد. آنالیز تاثیر تغییر اقلیم بر عملکرد اقتصادی با بررسی هزینه تراز شده انرژی به ازای هر کیلووات ساعت بررسی می‌گردد و در خصوص تاثیرات محیط زیستی تحلیل میزان انتشار گاز های گلخانه ای و به ویژه کربن دی اکسید توسط توربین هدف قرار میگیرد[11]. در این راستا پژوهش هایی پیرامون بررسی پارامتر های توان تولیدی، ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی با هدف تحلیل و بهینه سازی سیستم های بادی ، انجام گرفته است. در ادامه برخی از پژوهش های انجام شده در این زمینه و موارد مشابه مرور می‌گردد.
در راستای تحلیل های اقتصادی توربین های بادی پارامتر های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته اند. در این خصوص، فریدمن در پژوهشی ضمن ارائه یک روش برای تعیین بازده اقتصادی و احتمال موفقیت یک توربین بادی، پارامترهای موثر بر تحلیل اقتصادی را: هزینه اولیه ، هزینه عملیاتی سالانه ، نرخ بهره، دوره بازپرداخت وام، عمر توربین و هزینه انرژی و تورم معرفی نمود[12]. در پژوهشی دیگر لی و همکاران روشی برای ارزیابی دقیق میزان دوام اقتصادی یک توربین بادی در ابعاد کوچک ارائه دادند. در این روش از نرم افزارهای هومر و اکسل برای تجزیه و تحلیل انرژی و

اقتصادی آن استفاده کردند[13]. سانگ و همکاران با هدف به حداکثر رساندن تولید انرژی با حداقل هزینه با بهینه سازی دو پارامتر توان نامی و شعاع روتور در سرعت های باد مختلف در ارتفاعات بالا پرداختند. نتایج موردی آنان برای دو منطقه ی ارتفاعات مغولستان و چین بیانگر افزایش هزینه انرژی به میزان تقریبی ۱۵٪ و ۱۸٪ در صورت نادیده گرفتن ارتفاع بوده است[14]. پژوهش دیگری بر روی تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی انرژی باد در دریا ها به منظور طراحی بهینه نسل آینده توربین های بادی در اروپا انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات سرعت باد طی سالهای ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ هزینه تراز شده برق و همچنین فاکتور کیفیت مربوطه را با استفاده از شبیه سازی بدست آورند. نتایج این تحقیق نشان داد که پتانسیل کلی انرژی باد در دریاها، در سرتاسر اروپا تقریباً ٦/٨ تریلیون وات و ٤٠ پتا وات ساعت و میانگین برق تراز شده تا سال ۲۰۵۰ در حدود ۷ یورو به ازای هر کیلو وات ساعت خواهد بود[15]. رودریگز به بررسی روشی نوین برای برآورد فنی و اقتصادی تولید انرژی باد با توجه به دو رویکرد به حداکثر رساندن درآمد یا به حداقل رساندن هزینه در هر کیلووات ساعت، در مناطق نسبتا بزرگ پرداختند[16].

در زمینه زیست محیطی توربین های بادی، کومار و اودین به بررسی انتشار گازهای گلخانه ای و تحلیل اثرات زیست محیطی توربین بادی با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر پرداختند. آنان یک توربین محور عمودی و یک توربین محور افقی در تایلند را با استفاده از نرم افزار SimaPro 7.3.3 تحلیل نمودند و نتایج آنان نشان داد که توربین محور عمودی انتشار بیشتری در مقایسه با توربین محور افقی دارد[17]. در پژوهشی دیگر ونگ و همکاران به روش ارزیابی چرخه عمر به بررسی انتشار گاز گلخانه ای توربین های بادی پرداختند برای این مطالعه توربین بادی با ظرفیت نامی ۲ مگاوات در نظر گرفتند. نتایج آنان بیانگر کمتر بودن انتشار گازهای گلخانه ای این سیستم ها نسبت به سوخت های فسیلی می باشد[18]. از دیگر اسیب های تخریبی توربین های بادی بحث آلودگی صوتی این می باشد که در این خصوص کاتیناس و همکاران به کمک الگوریتم تبدیل سریع فوریه به تجزیه و تحلیل انتشار آلودگی صوتی توربین های باد و تاثیر آن بر محیط زیست پرداختند. نتایج آنان نشان داد هنگامی که سرعت باد در حدود ۱۲ متر بر ثانیه و فاصله از توربین بیشتر از ۱۰۰ متر باشد صدای ایجاد شده توسط توربین با صدای زمینه ایجاد شده توسط باد پنهان می شود بدین ترتیب تاثیر آلودگی صوتی بر محیط زیست کمتر می شود[19].

همچنین پژوهش هایی نیز حول امکان سنجی استفاده از انرژی های تجدید پذیر به ویژه انرژی بادی در ایران انجام شده است. در این خصوص قبادیان و همکاران در یک پژوهش به مرور تحقیقات و پژوهش های صورت گرفته پیرامون استفاده از پتانسیل منابع تجدید پذیر و به ویژه انرژی بادی در ایران پرداختند[20]. در پژوهشی دیگر بهرامی و عباسزاده ضمن بررسی پتانسیل ایران در انواع انرژی های تجدید پذیر بیان نمودند توان اسمی پارک های بادی که می توانند در سایت های موجود با پتانسیل باد قابل توجه در ایران احداث شوند ، تقریباً ٦٥٠٠ مگاوات است که میانگین فاکتور ظرفیت سالانه این پارک های بادی ۳۳ درصد تخمین زده شده است[21].

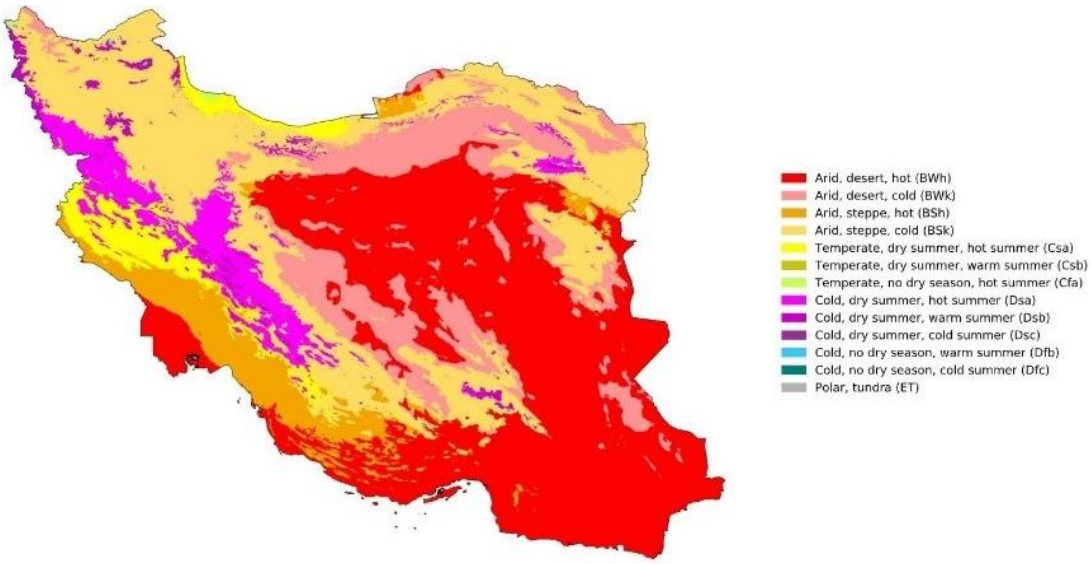
باتوجه به پژوهش های تجربی و عددی انجام گرفته بر روی توربین های بادی در موضوعات مختلف: شبیه سازی عددی، بهینه سازی، آزمایشات تجربی، آنالیز انرژی، اقتصادی و محیط زیستی و با در نظر گرفتن پتانسیل بالای ایران در منابع تجدید پذیر به ویژه منابع بادی در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم آب و هوایی بر عملکرد توربین های بادی در چارچوب تحلیل های چند معیاره شامل : حوزه های اقتصادی و زیست محیطی بررسی می‌گردد. یافتن اقلیم مناسب برای امکان سنجی یا احداث یک نیروگاه بادی که بهینه ترین شرایط را دارا باشد هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. نوآوری پژوهش حاضر در ارزیابی تاثیر اقلیم های آب وهوایی بر عملکرد سیستم های توربین بادی و استفاده از سیاست های تبیهی و تشویقی در تحلیل های زیست محیطی می‌باشد. در راستای تحقق این هدف ضمن انجام یک مطالعه موردی با انتخاب ٤ اقلیم آب و هوایی قالب بر کشور، به بررسی فاکتور های هزینه طراز شده انرژی و مقدار کربن دی اکسید تولیدی(با درنظرگیری چرخه عمر سیستم و هزینه کربن دی اکسید تولیدی بر مبنای سیاست های تشویقی و تنبیهی)، پرداخته می‌شود. نهایتاً با آنالیز داده های فوق، یک طبقه بندی کلی از دید هر یک از دو حوزه، اقتصادی و زیست محیطی، ارائه می‌گردد.

۲- پتانسیل انرژی بادی در ایران

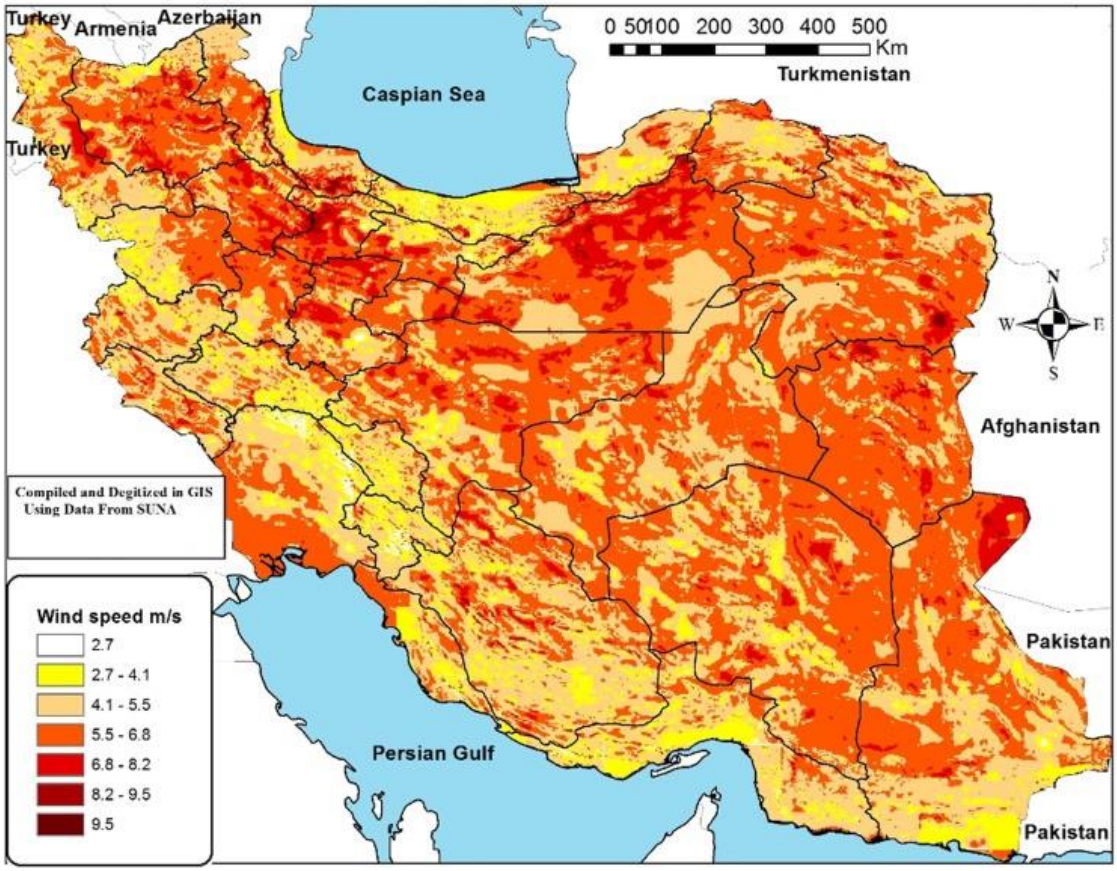
کشور ایران، با قرار گیری در قاره آسیا و مساحتی معادل ١/٦٥ میلیون کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۸۰ میلیون نفر، دارای چهار اقلیم آب و هوایی: معتدل مرطوب (ساحل جنوبی دریای خزر)، معتدل و نیمه خشک (سواحل جنوبی)، گرم و خشک (کویر لوت)، قاره ای مرطوب مطابق شکل ۱، می‌باشد[22].

این کشور در بین مدارهای ۲۹ تا ٤١ درجه ی عرض شمالی قرار داشته و در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ پتانسیل انرژی بادی در بین نقاط جهان در بالاترین رده ها قرار دارد[24]. مطابق شکل ۲، پراکندگی و محدوده سرعت باد در بخش های کشور مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد کشور ایران با میانگین سرعت باد در محدوده ۵ تا ٦ متر برثانیه بالاتر از میزان متوسط جهانی می باشد[25].

دیگر متغیرهای اب و هوایی موثر بر تحلیل های مورد مطالعه پیرامون توربین های بادی عبارتند از: سرعت باد و میزان فراوانی هر محدوده ی سرعت در طی دفعات اندازه گیری آن به صورت ماهانه (ماه میلادی) و تعداد ساعات کاری توربین که براساس نوع



شکل ۱) طبقه بندی اقلیم های مختلف کشور ایران (بر اساس طبقه بندی کوپن-گایگر) [23]



شکل ۲) نقشه پتانسیل انرژی بادی در ایران[25]

جدول ۱) اقلیم جغرافیای شهر های مورد مطالعه بر اساس طبقه بندی کوپن[26]

شهر	طول جغرافیای (E)	عرض جغرافیای(N)	نوع اقلیم آب و هوایی (کلاس طبقه بندی کوپن)	ارتفاع از سطح دریا
رشت	۴۹°۵۹′	۳۷°۲۷′	(معتدل مرطوب) Cfa	-۸
تهران	۵۱°۱۹′	۳۵°۴۱′	(معتدل نیمه خشک) BSh	۱۱۹۱
آبادان	۴۸°۱۵′	۳۰°۲۲′	(گرم و خشک) BWh	۷
سنندج	۴۷°۰۰′	۳۵°۲۰′	(قاره ای مرطوب) Dsa	۱۳۷۳

توربین در محدوده مشخصی از سرعت منجر به تولید توان می‌گردد در ادامه و پس معرفی نوع توربین، روابط مربوطه و شیوه مدل‌سازی ارائه می‌گردد.

۳-شرح سیستم مورد تحلیل

برای مطالعه اثر تغییر اقلیم آب و هوایی بر مطالعات زیست محیطی و اقتصادی، لازم است یک توربین بادی با ابعاد معین، به عنوان مرجع مدل‌سازی عددی انتخاب گردد. بدین منظور از توربین بادی محور افقی *Bergey Excel S 10 kW* که پیش تر در مطالعات احیایی و همکاران[27] به عنوان مرجع مدل‌سازی عددی استفاده شده بود استفاده می‌گردد. در شکل ۳ تصویری از این توربین بادی که مرجع مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر است، ملاحظه می‌گردد. خواص کلی توربین بادی *Bergey Excel S* در جدول ۲ موجود است. این خواص شامل ابعاد هندسی ، سرعت های محدوده کاری توربین، محدوده دمایی قابل تحمل توربین و سایر مشخصات مورد نیاز مدل‌سازی می باشند.

سیستم مورد بررسی شامل حجم کنترلی است که سیال ورودی (انرژی باد) از مرز های آن وارد شده و ضمن انتقال توان باعث اتلافی ، از آن خارج می‌گردد. شماتیک حجم کنترل سیستم در شکل ۴ ارائه گردیده است.

چرخش پره های توربین گشته و سیال خروجی بهمراه انرژی در این پژوهش هدف مطالعه دو مورد از خروجی های شکل ۴ یعنی هزینه واحد انرژی و میزان کربن منتشر شده به محیط زیست می باشد.

شکل ۳) توربین مرجع مدل سازی (Bergey excel S 10 kW)

۴-مدل سازی ریاضی

۴-۱- محاسبه توان مفید

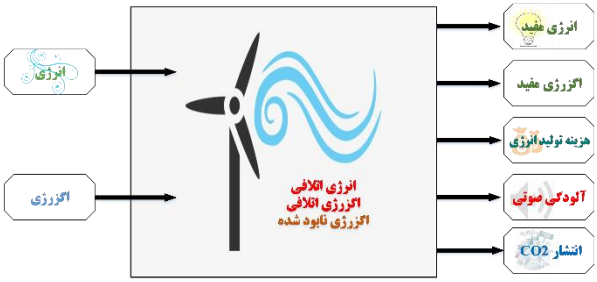
حساسیت شدید توان تولید شده توسط توربین بادی به سرعت باد، به گونه ایست که تنها در محدوده معینی از سرعت توان تولیدی توربین برابر مقدار نامی آن می‌باشد. همچنین در صورتی که مقدار سرعت از حداکثر سرعت مجاز برای توربین بیشتر یا از حداقل سرعت لازم برای تولید توان کمتر باشد، توربین به اصطلاح از مدار خارج می‌گردد. میزان توان تولید شده توسط توربین بادی را می‌توان رابطه (۱) محاسبه نمود[28].

$$\begin{aligned} P_e &= 0 && (u < u_c) \\ P_e &= a + bu^k && (u_c \le u \le u_r) \\ P_e &= P_{er} && (u_r \le u \le u_f) \\ P_e &= 0 && (u > u_f) \end{aligned} \qquad (۱)$$

که در آن P_{er} توان نامی توربین بوده و u_c برابر با حداقل سرعت لازم برای تولید توان می‌باشد. u_r سرعت آستانه رسیدن به تولید توان نامی می باشد. u_f ماکزیمم سرعتی است که توسط توربین منجر به تولید توان می گردد. و ضرایب a و b توسط روابط (۲) و (۳) بدست می‌آیند[29].

$$a = \frac{P_{er}u_c^k}{u_c^k - u_r^k} \qquad (۲)$$

$$b = \frac{P_{er}}{u_r^k - u_c^k} \qquad (۳)$$



شکل ۴) شماتیک حجم کنترل یک سیستم بادی

جدول ۲) مشخصات توربین بادی مرجع مدل‌سازی

نماد	پارامتر	مقدار	واحد
u_c	Cut-in wind speed	۳/۱	m/s
u_r	Rated wind speed	۱۳/۸	m/s
u_f	Furling wind speed	۱۵/۶	-
$P_{e,r}$	توان نامی	۱۰	kW
-	نوع	توربین ۳ پره	-
C	قیمت توربین	۳۱۷۷۰	$
A_s	مساحت جاروب شده	۳۸/۴۷	m^2
T	محدوده دمایی	۴۰- تا ۶۰	^0C
H	ارتفاع برج	۲۴	m
D	قطر روتور	۷	m
L	طول عمر	۲۰	سال
i	نرخ تنزیل	۲۲	%

همچنین k پارامتر شکل ویبول می باشد و از رابطه (٤) محاسبه می‌گردد[30].

$$k = (\frac{\sigma}{\overline{u}})^{-1.086} \quad (٤)$$

برای محاسبه σ و میانگین سرعت $\overline{u}$ از روابط (٥) و (٦) استفاده می‌شود[27].

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n} m_i u_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} m_i u_i\right)^2\right] \quad (٥)$$

$$\overline{u} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_i u_i \quad (٦)$$

در روابط بالا، m_i فراوانی سرعت مورد محاسبه (u_i) در بین تمام دفعات اندازه گیری شده (n) می‌باشد که در شکل ۴ مقدار این پارامتر برای هر شهر و ماه به تفکیک سرعت آورده شده است. در پایان با محاسبه موارد فوق، توان مفید خروجی به ازای هر سرعت محاسبه می‌گردد و پس از میانگین گیری ماهانه از توان ها، توان مفید هر شهر به صورت محاسبه می‌شود.

۴-۲- آنالیز اقتصادی

در آنالیز اقتصادی توربین های بادی هدف اصلی محاسبه هزینه هر کیلووات ساعت انرژی تولید شده توسط توربین باد می باشد. که این هزینه از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد[27].

$$C_E = C_I + C_O + C_{Ins} \quad (۷)$$

در رابطه بالا، C_I هزینه اولیه تجهیزات، C_O هزینه تعمیر و نگهداری و C_{Ins} هزینه بیمه، بر حسب $\frac{\$}{kWh}$ می باشند. برای محاسبه هزینه اولیه تجهیزات از رابطه (۸) استفاده می‌گردد[27].

$$C_I = \frac{CI}{8760 P_{e,ave}} \quad (۸)$$

در این رابطه C هزینه اولیه ی نصب تجهیزات بر حسب $\frac{\$}{kWh}$ بوده و I ضریب مربوط به عمر تجهیزات (L) و نرخ بهره (i) بوده و از رابطه (۹) بدست می آید[27].

$$I = \frac{i(i+1)^L}{(i+1)^L - 1} \quad (۹)$$

مقادیر مربوط به عمر توربین بادی و نرخ بهره[31] در جدول مربوط به مشخصات توربین مورد مطالعه، (جدول ۲) ، آورده شده است. همچنین با توجه به مرجع های موجود مجموع هزینه نگهداری وتعمیرات و هزینه بیمه برابر با ٦ % هزینه راه اندازی در نظر گرفته می‌شود[27].

۴-۳- آنالیز زیست محیطی

آنالیز زیست محیطی سیستم سیستم های انرژی توسط فیزال وهمکاران[32] طبق رابطه (۱۰) معرفی شده است.

$$x_{co2} = y_{co2} \times \dot{p}_u \times t_{working} \quad (۱۰)$$

که در آن x_{co2} برابر مقدار کربن دی اکسید آزاد شده در زمان در نظر گرفته شده بوده و y_{co2} برابر مقدار کربن دی اکسید مربوط به سیستم انرژی مرجع است که توسط روش ارزیابی چرخه حیات بدست آمده است. $\dot{p}_u$ برابر نرخ توان تولیدی سیستم مرجع و $t_{working}$ زمان کارکرد سیستم می‌باشد.

ارزیابی چرخه حیات (ارزیابی چرخه عمر) یکی از روش های ارزیابی زیست محیطی است که امروزه به عنوان یکی از روش های استاندارد و پرکاربرد در ارزیابی محیط زیستی فرآیندها و محصولات مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع ارزیابی چرخه حیات به عنوان یکی از روش های ارزیابی زیست محیطی بعد از ارزیابی فنی و ارزیابی اقتصادی تکمیل کننده ضلع سوم یک ارزیابی پایدار است که کمک می کند تا علاوه بر ابعاد فنی و اقتصادی، از نظر محیط زیستی نیز با اطمینان اقدام گردد. در این روش یک ارزیابی کلی از اثرات زیست محیطی محصول، از فرآیند استخراج تا فرآیند دور ریز و بازیافت انجام شده و نهایتاً منجر به شاخص آلایندگی کلی می‌گردد[23]. در شکل ۵ شماتیکی از این روش ارائه گردیده است.

در جدول ۳ مقایسه ای میان مقادیر مختلف مربوط به y_{co2} در سیستم های مختلف ارائه گردیده است[33]. لازم به ذکر است مقادیر ارائه شده در جدول ۳ با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات بدست آمده اند.

برای آنالیز زیست محیطی سیستم های انرژی روش های دیگری نیز وجود دارد که از روش های نوین این حوزه می‌توان به آنالیز محیطی اقتصادی که توسط دنیز و همکاران[37] مطابق رابطه‌ی (۱۱) ارائه گردیده است اشاره نمود.

$$C_{co2} = x_{co2} \times c_{co2} \quad (۱۱)$$

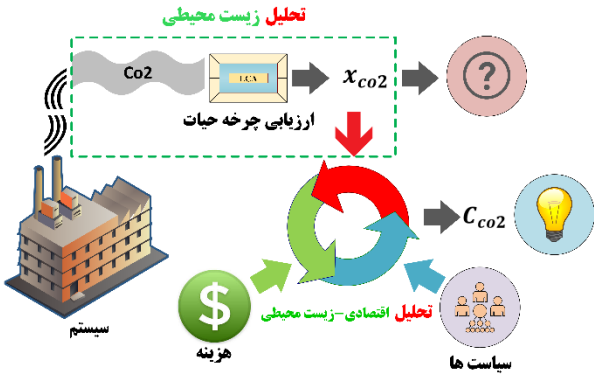
که در آن C_{co2} پارامتر محیطی اقتصادی و c_{co2} قیمت انتشار کربن دی اکسید می‌باشد. پارامتر بدست آمده در واقع هزینه ی انتشار کربن دی اکسید تولیدی در سیستم مربوطه بوده و به عنوان روشی برای ارزیابی سیستم های انرژی از منظر زیست محیطی در نظر گرفته می‌شود[23]. برای جلوگیری از تغییرات آب و هوایی و پدیده هایی چون گرمایش جهانی روش ها و سیاست هایی ارائه گردیده اند تا انتشار دی اکسید کربن را تا حد ممکن کاهش دهند.

شکل ۵) شماتیک روش ارزیابی چرخه حیات[23]

روش قیمت گذاری کربن با رویکرد اقتصادی سعی در ملموس تر کردن اثرات زیست محیطی برای آنالیز دقیق تر موضوع داشته و با تدوین سیاست های تشویقی یا تنبیهی(جریمه مالی) باعث کاهش اثرات زیست محیطی سیستم های انرژی می‌گردد. در شکل ٦ شماتیکی از کاربرد آنالیز محیطی- اقتصادی و نحوه تعامل آن با آنالیز زیست محیطی، ارائه گردیده است. هزینه کربن تولیدی در کشور های مختلف بنا به سیاست های آنان متفاوت است و مقداری بین ۱۳ تا ١٦ دلار به ازای هر تن کربن دی اکسید تولیدی دارد[38]. در این پژوهش با توجه به بازه تغییرات قیمت، مقدار میانگین ١٤/٥ دلار بر تن معادل ۰/۰۱٤٥ دلار بر کیلوگرم کربن دی اکسید در نظر گرفته شده است[39].

۵-مدل‌سازی

در راستای تحلیل سیستم یک توربین محور افقی، ضمن توسعه ی یک مدل عددی در نرم افزار متلب، نسبت به مطالعه اثر تغییرات اقلیمی بر پارامتر های اقتصادی و زیست محیطی اقدام گردید. برنامه ی نوشته شده ضمن دریافت داده های محیطی و اقلیمی دریافت شده از سایت اطلاعات هواشناسی، با توجه به سرعت باد، ابتدا فراوانی هر محدوده سرعت در بازه های زمانی ماهانه و ساعات کارکرد توربین که منجر به تولید توان می‌شود، را محاسبه نموده و ضمن بررسی توان مفید توربین ، هزینه تراز شده انرژی و پارامتر زیست محیطی و پارامتر محیطی-اقتصادی مربوط به هر ماه و هر شهر را مطابق فلوچارت شکل ۷ ارائه می‌دهد.



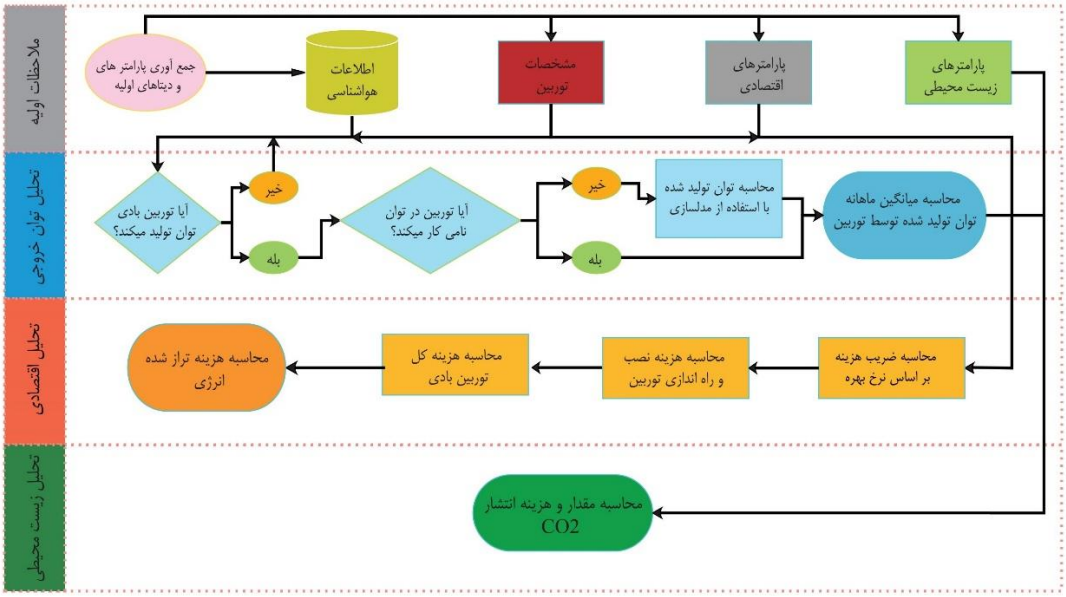
شکل ۶) ارتباط بین آنالیز زیست محیطی و آنالیز محیطی-اقتصادی [23]

بر اساس فلوچارت شکل ۷، برنامه نوشته شده شامل ۴ بخش عمده می‌باشد. در بخش اول اطلاعات هواشناسی از پایگاه مربوطه به نرم افزار وارد می‌شود و توسط مدل‌سازی به صورت میانگین ماهانه طبقه بندی می‌گردد. در بخش دوم بر اساس مشخصات توربین بحث توان تولید شده ارزیابی می‌گردد و برمبنای نتایج این بخش در بخش های بعدی مفاهیم اقتصادی و زیست محیطی بررسی می‌گردند. مدل‌سازی انجام شده به گونه ایست که امکان استخراج نتایج به صورت ماهانه و سالانه امکان پذیر باشد.

در مدل‌سازی پژوهش حاضر، تمام شرایط مربوط به توربین مورد مطالعه شامل عمر، دوام و سازگاری در تمام شرایط آب و هوایی یکسان در نظر گرفته می‌شود تا امکان مقایسه نتایج فراهم گردد.

جدول ۳) میزان کربن دی اکسید آزاد شده [34-36]

زغال سنگ	پیل سوختی	هسته ای	کلکتور خورشیدی	گاز طبیعی	پنل خورشیدی	بادی	نوع سیستم
۰/۱-۹۶۰/۰۵	۰/۶۶۴	۰/۰-۰۲۴۲/۰۶۶	۰/۰۰۶۴۷	۰/۴۴۳	۰/۰-۰۵۳۴/۲۵	۰/۰-۰۹۷/۱۲۴	کربن دی اکسید ازاد شده (kg CO2/kWh)



شکل ۷) فلوچارت مدل‌سازی

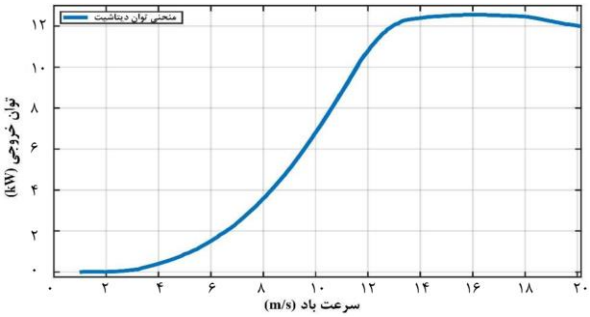
همچنین در طبقه بندی داده های برداشت شده فرض بر این است خطای انسانی وجود ندارد و به تمام مقادیر ارائه شده استناد می‌گردد.

۶-اعتبارسنجی

پیش از ارائه ی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، شایسته است، صحت عملکرد مدل‌سازی انجام شده، اثبات گردد. در این راستا، نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی با اطلاعات موجود در دیتا شیت ارائه شده توسط شرکت مقایسه می‌گردد. بدین منظور با استفاده از میانگین سرعت هر شهر توان خروجی از توربین به کمک نمودار شکل ۸ که از کاتالوگ شرکت استخراج گردیده است بدست آمده و سپس با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه می‌گردد.

جهت بررسی صحت نتایج، در جدول ۴ توان خروجی توربین که از مدل‌سازی عددی بدست آمده با نتایج استخراج شده از نمودار شکل ۸ توسط نرم افزار پلات دیجیتایزر مقایسه می‌گردد. برای محاسبه مقادیر مستخرج از منحنی توان ابتدا میانگین سرعت باد در یک سال برای هر شهر محاسبه می‌گردد و سپس با توجه به منحنی شکل ۸ مقدار توان مربوط به آن شهر استخراج می‌گردد. همچنین برای محاسبه مقادیر مستخرج از مدل‌سازی، به تعداد دفعات برداشت داده از سرعت باد و مشخصات هواشناسی با توجه به مدل‌سازی انجام شده توان تولیدی محاسبه می‌گردد و نهایتا با میانگین گیری از توان های بدست آمده توان میانگین نهایی برای هر شهر محاسبه می‌گردد.

مدل‌سازی عددی می‌باشد. دلیل خطای موجود می‌تواند تحت تاثیر عواملی همچون : پراکندگی داده های سرعت باد از مقادیر میانگین آن، فرضیات مدل‌سازی، خطای مربوط به طبقه بندی داده‌ها و استفاده از یک مدل‌سازی یکسان بدون در نظر گرفتن شرایط جوی متفاوت به وجود آید.



شکل ۸) منحنی توان توربین Bergey excel S 10 kW

۷-نتایج مدل‌سازی

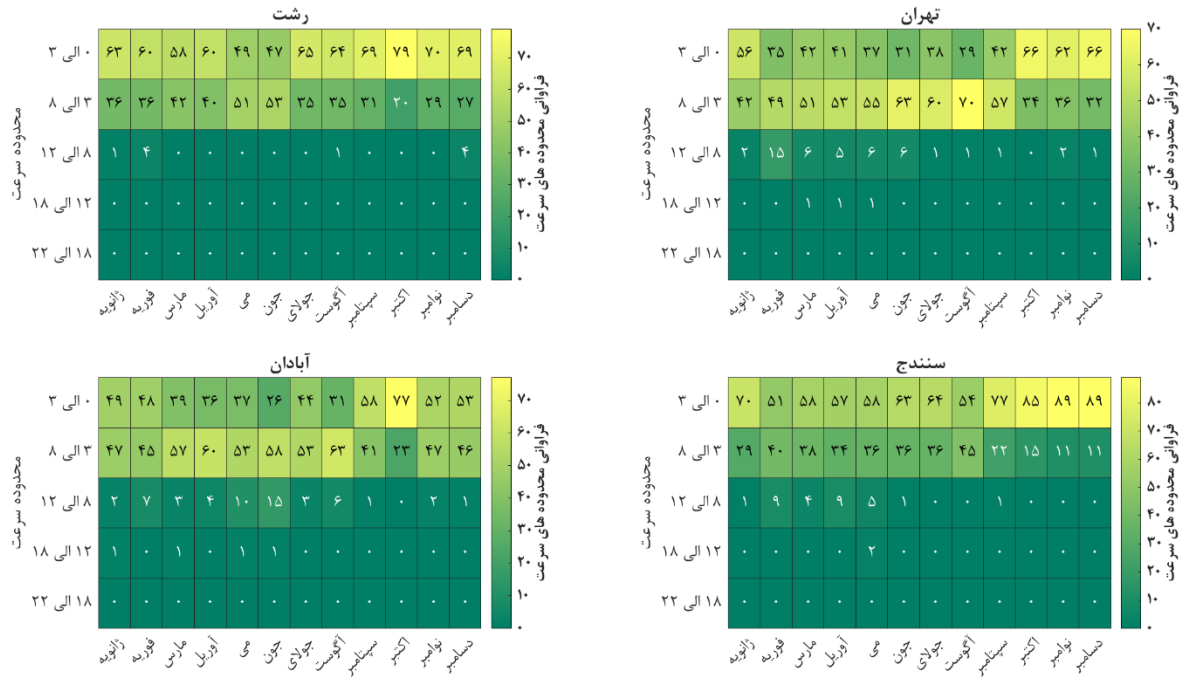
با توجه به هدف اصلی این پژوهش یعنی مطالعه اثر اقلیم های آب و هوایی مختلف بر توربین های بادی، پژوهشی با محوریت حوزه‌های اصلی اقتصادی و زیست محیطی تعریف گردیده و ضمن توسعه یک مدل عددی بر مبنای توربین محور افقی سه پره ساخته شده توسط شرکت *Bergey* ، نسبت به محاسبه پارامتر های اساسی اقدام گردیده است. پیش از ارائه نتایج مربوط به آنالیز های حوزه ی اقتصادی و زیست محیطی شایسته است، ابتداً پیرامون موثرترین پارامتر اقلیمی بر توان توربین بادی، یعنی شدت و سرعت باد و همچنین ساعات کارکرد توربین بحث گردد. با توجه به در نظر گرفتن ۴ شهر رشت، تهران، آبادان و سندج به عنوان نمایندگان ۴ اقلیم ها اصلی ایران، بررسی میزان سرعت و پایداری باد مربوط به هر اقلیم در ماه های مختلف سال ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور ابتدا سرعت باد و میزان فراوانی هر محدوده ی سرعت در طی دفعات اندازه گیری آن به صورت ماهانه (ماه میلادی) و تعداد ساعات کاری توربین که براساس نوع توربین در محدوده مشخصی از سرعت منجر به تولید توان می‌گردد در شکل ۹ و جدول ۵ ارائه میشوند.

در ادامه در شکل ۱۰ سرعت متوسط ماهانه برای هر یک از شهر ها محاسبه می‌گردد. از آنجایی که پژوهش انجام شده دیدگاهی سالانه دارد، تمام داده های ارائه شده به صورت میانگین مقدار روزانه در هرماه مورد محاسبه قرار گرفته اند.

روند داده های ارائه شده در شکل ۱۰ به گونه ای است که کمترین میزان میانگین سرعت برای شهر سنندج و بیشترین آن در شهر آبادان ملاحظه می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود ماکزیمم میانگین سرعت در دو شهر رشت و آبادان بر اساس شرایط جغرافیایی مربوطه در ماه جون و در دو شهر تهران و سنندج در ماه فبریه اتفاق میفتد. سرعت متوسط و پراکندگی سرعت ها نسبت به میانگین از مهم ترین پارامتر های تحلیل توربین های بادی میباشند. به گونه ای که هرچه پراکندگی داده ها از میانگین کمتر باشد میتوان انتظار خروجی بهتری از توربین بادی داشت. برای درک بهتر این موضوع در شکل ۱۱ ماکزیمم سرعت هر شهر، در

جدول ٤) مقایسه توان خروجی توربین حاصل از مدل‌سازی با منحنی توان شکل ۸ جهت اعتبار سنجی مدل‌سازی

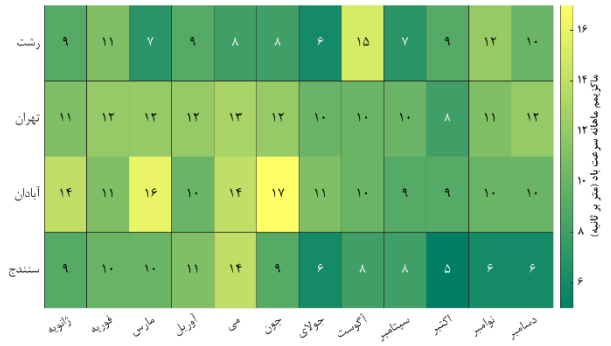
شهر	نتایج مستخرج از منحنی توان	نتایج مستخرج از مدل‌سازی	خطا %
رشت	۰/۵۵۴	۰/۵۹۲	**۶/۸**
تهران	۰/۸۳۳	۰/۸۸۳	**۶**
آبادان	۰/۹۱۳	۰/۹۴	**۳/۳**
سنندج	۰/۶۱۸	۰/۶۴۷	**۴/۷**
میانگین خطا %		**۵/۲**	



شکل ۹) فراوانی محدوده های سرعت در طی دفعات داده برداری

جدول ۵) میانگین ماهانه ساعات کارکرد توربین

	شهرها			
	رشت	تهران	آبادان	سنندج
ژانویه	٤/٤	٤/٩	٧/٩	٤/١
فوریه	٥/٦	١٠/١	٩	٨/٦
مارس	٤	٨/٨	١٠/٧	٦/٩
آوریل	٥/٢	٨/٨	١٠/٤	٨
می	٦/٦	١٠/٢	١٠/٧	٦/٨
جون	٦/٩	١٠/٦	١٤/٤	٥/٨
جولای	٣/١	٨/٩	٩/١	٤/٩
آگوست	٤/٢	٩/٨	١١/٨	٦/٦
سپتامبر	٣	٦	٥/١	٢/٩
اکتبر	٢/٢	٢/٣	٢/٢	١/٧
نوامبر	٢/٧	٤	٨/٣	١/٦
دسامبر	٤/١	٢/٥	٦/٥	١/٣



شکل ۱۰) سرعت متوسط ماهانه باد

شکل ۱۱) بیشینه مقدار سرعت باد در هرماه

هرماه ارائه گردیده است تا میزان پراکندگی آن نسبت به میانگین سرعت مشخص گردد.

پس از انجام محاسبات پیش نیاز جهت مطالعه عملکرد اقتصادی و زیست محیطی توربین های بادی در شرایط جغرافیایی مختلف در ادامه با توجه به روند فلوچارت شکل ۷ به محاسبات مربوط به

توان خروجی، هزینه تراز شده انرژی و مقدار و هزینه جزیمه ای ناشی از انتشار گاز کربن دی اکسید پرداخته می‌شود

۷-۱- تحلیل سیستم از دیدگاه توان تولید شده

همانگونه که در شکل ۴ اشاره گردید، نحوه توزیع انرژی در سیستم به گونه ای است که انرژی باد به عنوان ورودی به مرز های سیستم وارد شده و بخشی از آن در اثر پدیده های انتقال حرارت تلف گردیده و نهایتاً مقدار باقی مانده به عنوان انرژی مفید به توان الکتریکی تبدیل می‌گردد. در جدول ۶ میزان توان مفید خروجی از توربین ارائه گر دیده است.

همانطور که در جدول ۶ مشهود است شهر آبادان که دارای اقلیم آب و هوایی گرم و خشک می‌باشد به دلیل داشتن سرعت متوسط میانگین بالاتر که در شکل ۱۰ ارائه گردید و همچنین پراکندگی کمتر در داده های مربوط به سرعت باد، بالاترین توان خروجی را در بین سایر شهر ها دارا می‌باشد.

۷-۲- تحلیل سیستم از دیدگاه اقتصادی

در راستای تحلیل اقتصادی سیستم توربین بادی پیرامون هزینه تولید واحد انرژی بحث می‌گردد. در این خصوص با توجه به طول عمر و نرخ بهره که در جدول ۲ بیان گردید و سایر شرایط جانبی از جمله هزینه تعمیرات و نگهداری و همچنین بیمه تجهیزات و کارکنان، با سرشکن کردن هزینه کل بر انرژی کل تولیدی توسط توربین، هزینه تولید یک واحد انرژی به ازای هر کیلووات ساعت محاسبه می‌گردد. در شکل ۱۲ هزینه طراز شده انرژی به صورت ماهانه برای هر شهر ارائه شده است.

از شکل ۱۲، استنباط می‌شود با در نظر گرفتن هزینه کل یکسان در تمام شهر ها، آن شهری که توان بیشتری تولید میکند، هزینه واحد انرژی کمتری خواهد داشت. بنابراین از آنجا که مطابق جدول ۶ عموما بالاترین مقدار توان مفید مربوط به شهر آبادان می‌باشد لذا هزینه انرژی طراز شده (هزینه واحد انرژی) در این شهر کمترین مقدار را دارد. برای مقایسه بهتر شهر ها و اقلیم های مربوطه در شکل ۱۳ میانگین سالانه هزینه واحد انرژی برای هر شهر ارائه می‌گردد.

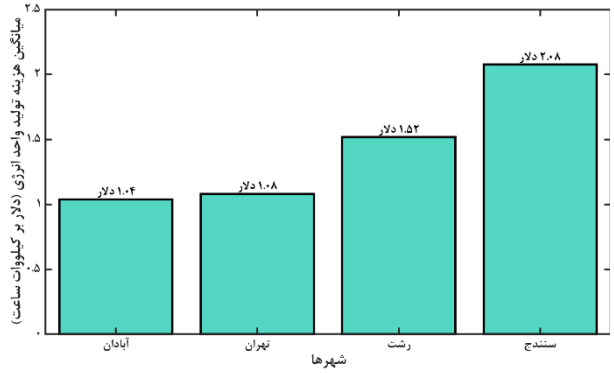
چنان چه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود شهر سنندج با آب و هوای قاره ای بالاترین هزینه واحد انرژی و آبادان با اقلیم گرم وخشک کمترین مقدار را دارند. بنابراین از دید حوزه اقتصادی شهر آبادان با اقلیم آب و هوایی گرم و خشک و هزینه طراز شده انرژی $/kWh ۱/۰۴ به عنوان گزینه برتر معرفی می‌گردد.

۷-۳- تحلیل سیستم از دیدگاه زیست محیطی

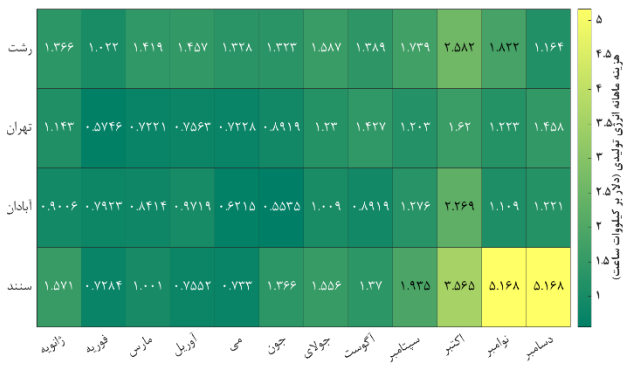
در راستای تحلیل زیست محیطی سیستم توربین بادی می‌توان مقدار کربن دی اکسید تولیدی را به عنوان یک پارامتر اساسی مطرح نمود. لازم به ذکر است میزان کربن دی اکسید تولید شده توسط انرژی های تجدید پذیر به مراتب کمتر از سوخت های فسیلی است. لذا استفاده از انرژی های تجدید پذیر نقش بسزایی

جدول ۶) توان تولید شده به صورت میانگین ماهانه

ماه	جون	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
شهرها			توان مفید خروجی بر حسب کیلو وات			
رشت	۰/۶۵	۰/۵۴	۰/۶۵	۰/۵۹	۰/۸۴	۰/۶۳
تهران	۰/۹۷	۱/۱۹	۱/۱۴	۱/۱۹	۱/۵۰	۰/۷۵
آبادان	۱/۵۶	۱/۳۹	۰/۸۹	۱/۰۲	۱/۰۹	۰/۹۶
سنندج	۰/۶۳	۱/۱۸	۱/۱۴	۰/۸۶	۱/۱۸	۰/۵۵
ماه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	**جولای**
شهرها			**توان مفید خروجی بر حسب کیلو وات**			
رشت	۰/۷۴	۰/۴۷	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۵۴
تهران	۰/۵۹	۰/۷۱	۰/۵۳	۰/۷۲	۰/۶۰	۰/۷۰
آبادان	۰/۷۱	۰/۷۸	۰/۳۸	۰/۶۸	۰/۹۷	۰/۸۵
سنندج	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۶۳	۰/۵۵



شکل ۱۳) میانگین سالانه هزینه واحد انرژی



شکل ۱۲) میانگین ماهانه هزینه واحد انرژی

در کاهش گاز های گلخانه ای دارند. مقدار کربن دی اکسید تولیدی در چرخه عمر سیستم (از لحظه تولید تا بازیافت و تخریب) تابعی از توان مفید خروجی می باشد. در جدول ۷ میانگین روزانه میزان کربن دی اکسید منتشر شده مربوط به ۴ شهر رشت، تهران، آبادان و سنندج به تفکیک ماه های مختلف سال، ارائه گردیده است.

همانگونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، از آنجا که میزان کربن دی اکسید تولید شده رابطه مستقیمی با توان خروجی از توربین دارد لذا در شهر آبادان که بالاترین توان تولید می‌گردد بالاترین میزان انتشار نیز ملاحظه می‌شود. برای بررسی و مقایسه شهر های مختلف در شکل ۱۴ مقدار سالیانه کربن دی اکسید تولید شده بر مبنای سرانه انرژی توسط توربین بادی برای هر شهر آورده شده است.

روند موجود در شکل ۱۴ نشان میدهد که مطابق انتظار شهر آبادان با توجه به توان تولیدی بیشتر نسبت به سایر شهر ها با بالاترین میزان انتشار، بیشترین اثر تخریبی بر محیط زیست را دارد. در نهایت از نگاه محیط زیستی می توان بیان نمود شهر رشت با اقلیم معتدل مرطوب و میزان انتشار ۱۵۶ کیلوگرم کربن دی اکسید در سال، کمترین میزان تخریب محیط زیست را بین سایر شهر ها داراست.

۷-۴- تحلیل سیستم از دیدگاه محیطی با نگرش اقتصادی

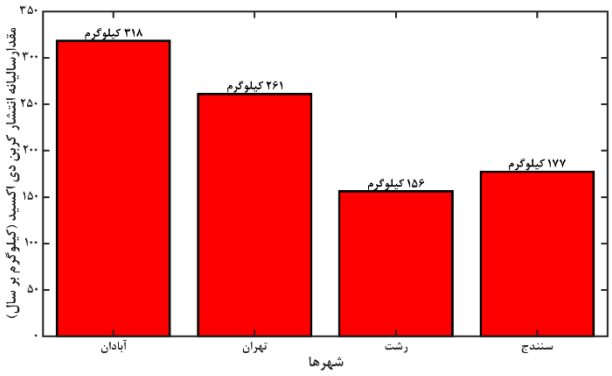
برای شفاف سازی تحلیل های زیست محیطی، می‌توان از فاکتورهای اقتصادی نیز بهره جست. زیرا همواره تبدیل یک موضوع به جنبه های مالی می تواند دید بهتری از مسئله ایجـاد کند. بحث مالی در این حوزه مربوط به هزینه جریمه انتشار کربن دی اکسید می باشد. در جدول ۸ داده های مربوط به تحلیل محیطی- اقتصادی سیستم توربین بادی به صورت میانگین روزانه در هر ماه آورده شده است.

مطابق انتظار روند داده های ارائه شده در جدول ۸ همان روند اطلاعات داده شده در جدول ۷ با بیان مالی می‌باشد. جهت مقایسه نهایی، شایسته است مقدار هزینه مربوطه به طور سالیانه محاسبه گردد. در شکل ۱۵ نمودار مقدار هزینه سالانه کربن دی اکسید تولیدی، در ۴ شهر مذکور ارائه گردیده است.

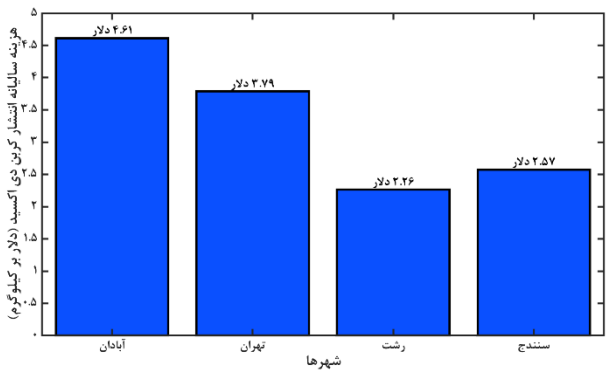
همانطور که بیان شد از آنجا که نتایج شکل ۱۵، برگرفته از نتایج شکل ۱۴ می‌باشد لذا روند نتایج نیز مشابه آن می باشد با این تفاوت که در این نمودار جهت تفهیم بهتر موضوع، مفهوم هزینه جریمه ناشی از انتشار سالانه کربن دی اکسید یک توربین بادی محور افقی به تصویر کشیده شده است. مطابق آنچه در بحث میزان کربن دی اکسید منتشر شده بیان گردید شهر رشت با داشتن پایین ترین هزینه جریمه که ناشی از پایین ترین مقدار انتشار می باشد

جدول ۷) میانگین روزانه میزان کربن دی اکسید منتشر شده در هرماه

ماه	جون	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
شهرها			پارامتر محیط زیستی (کیلوگرم کربن دی اکسید)			
رشت	۰/۶۸۷۱	۰/۶۵۹۳	۰/۵۲۴۸	۰/۳۹۹۵	۰/۵۵۵۶	۰/۴۳۷۲
تهران	۱/۰۵۸۸	۱/۰۲۰۲	۰/۸۸۳۷	۰/۸۸۰۶	۱/۰۱۳۸	۰/۴۹۳۵
آبادان	۱/۴۳۶۶	۱/۰۷۲۶	۱/۰۴۰۱	۱/۰۶۵۹	۰/۸۹۵۳	۰/۷۸۶۹
سنندج	۰/۵۷۶۰	۰/۶۸۲۵	۰/۷۹۷۵	۰/۶۸۵۷	۰/۸۶۱۷	۰/۴۱۱۴
ماه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	جولای
شهرها			پارامتر محیط زیستی (کیلوگرم کربن دی اکسید)			
رشت	۰/۴۱۴۶	۰/۲۶۹۶	۰/۲۲۳۱	۰/۲۹۸۵	۰/۴۲۱۲	۰/۳۱۳۶
تهران	۰/۲۵۲۱	۰/۴۰۱۷	۰/۲۳۲۳	۰/۵۹۲۵	۰/۹۷۹۶	۰/۸۹۳۹
آبادان	۰/۶۵۳۶	۰/۸۲۸۸	۰/۲۱۷۳	۰/۵۰۹۴	۱/۱۸۱۰	۰/۹۱۲۷
سنندج	۰/۱۳۱۳	۰/۱۶۳۴	۰/۱۷۱۴	۰/۲۸۹۵	۰/۶۵۸۲	۰/۴۸۵۳



شکل ۱۴) میزان سالانه انتشار کربن دی اکسید



شکل ۱۵) هزینه جریمه ای سالانه انتشار کربن دی اکسید

جدول ۸) میانگین روزانه هزینه جریمه ای کربن دی اکسید منتشر شده در هرماه

ماه	جون	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه
شهرها			**پارامتر محیطی-اقتصادی (دلار)**			
رشت	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۷۶	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۶۳
تهران	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۵۴	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۷۲
آبادان	۰/۰۲۰۸	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۱۴
سنندج	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۶۰
ماه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	**جولای**
شهرها			**پارامتر محیطی-اقتصادی (دلار)**			
رشت	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۴۵
تهران	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۳۰
آبادان	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۲۰	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۷۴	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۳۲
سنندج	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۷

جدول ۹) میانگین سالانه شاخص های میانگین سرعت باد، توان تولید شده، اقتصادی و زیست محیطی

شاخص	میانگین سرعت باد (متر برثانیه)		توان تولید شده (کیلووات)		اقتصادی (دلار بر کیلووات ساعت)		زیست محیطی (کیلوگرم Co2 بر سال)		زیست محیطی-اقتصادی (دلار بر کیلووات ساعت)	
شهرها	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	رتبه	مقدار	**رتبه**
رشت	۳/۰۲	سوم	۰/۵۹۲	چهارم	۱/۵۲	سوم	۱۵۶	اول	۲/۲۶	**اول**
تهران	۳/۸۷	دوم	۰/۸۸۳	دوم	۱/۰۸	دوم	۲۶۱	سوم	۳/۷۹	**سوم**
آبادان	۳/۹۱	اول	۰/۹۴	اول	۱/۰۴	اول	۳۱۸	چهارم	۴/۶۱	**چهارم**
سنندج	۲/۹۱	چهارم	۰/۶۴۷	سوم	۲/۰۸	چهارم	۱۷۷	دوم	۲/۵۷	**دوم**

بیشتر از سایر شهر ها دوستدار محیط زیست است.

نکته حائز اهمیت پیرامون نتایج شکل ۱۵ این است که هر چند هزینه جریمه یک توربین باد عدد کوچیکی می باشد اما در صورت در نظر گرفتن سیاست جریمه، و تعمیم محاسبات به نیروگاه های بادی، محاسبه این پارامتر از اهمیت بالایی برخوردار می‌گردد.

۸-نتیجه گیری و بحث

در پژوهش حاضر ؛ مطالعه ی رفتار یک توربین بادی محور افقی سه پره با نظر گرفتن شاخصه های اقتصادی و زیست محیطی با اثرات تغییرات اقلیمی بیان گردیده است. در این راستا توسعه یک مدل عددی منطبق بر مشخصات Bergey Excel S 10 kW ارایه شده است. نتایج اعتبار سنجی این مدل ریاضی با اطلاعات ارائه شده در کاتالوگ شرکت راستی ازمایی شده و سپس این نوع توربین بادی و مشخصه های منطبق بر آن در ۴ شهر ایران با ۴ اقلیم متفاوت که نماینده اقلیم های قالب کشور هستند شبیه سازی گردیده است. در خصوص تحلیل اقتصادی ضمن محاسبات بخش های مختلف هزینه تولید انرژی توسط یک توربین بادی، از جمله هزینه راه اندازی، تعمیرات و بیمه، هزینه واحد انرژی تولید شده توسط توربین بادی در هر اقلیم آب و هوایی حاصل گردید. همچنین در راستای مطالعه سیستم در حوزه زیست محیطی پارامتر های میزان کربن دی اکسید منتشر شده و هزینه جریمه ای ناشی از این انتشار محاسبه گردیدند. در پایان شایسته است جهت جمع بندی و مقایسه کلی شهر ها و اقلیم های آب و هوایی متفاوت، نتایج مطابق جدول ۹ در چند دسته کلی مطابق زیر طبقه بندی شوند :

- ✓ با توجه به اهمیت سرعت و پایداری وزش باد در تحلیل توربین های بادی، می توان بیان نمود اقلیمی که دارای میانگین سرعت بالاتر در کنار پراکندگی کمتر در داده های مربوط به سرعت باد باشد پتانسیل بیشتری برای تولید توان از طریق استفاده از توربین های بادی دارد.
- ✓ در خصوص تحلیل میزان توان تولیدی شهر آبادان با اقلیم آب و هوایی گرم و خشک با توجه به داشتن میانگین سرعت وزش باد حدود ۴ متر بر ثانیه و پراکندگی کمتر در داده های سرعت باد بالاترین میزان توان تولید را با میانگین حدود ۱ کیلووات به خود اختصاص داد.
- ✓ نتایج تحلیل از دیدگاه اقتصادی، شهر آبادان با اقلیم آب و هوایی گرم و خشک را با در نظر گیری نرخ بهره ۲۲ درصد، عمر ۲۰ سال و هزینه طراز شده انرژی ۱/۰۴ دلار به ازای هر کیلووات ساعت انرژی را به عنوان گزینه برتر معرفی می‌گردد.
- ✓ نتایج آنالیز زیست محیطی نیز شهر رشت با اقلیم آب و هوایی معتدل مرطوب را علیرغم داشتن کمترین توان تولیدی و با انتشار سالانه ۱۵۶ کیلوگرم کربن دی اکسید و هزینه جریمه ای ۲/۲۶ دلار بیشتر از سایر شهر ها دوست دار محیط زیست میداند.

در پایان میتوان بیان نمود پژوهش انجام گرفته می تواند باعث دستیابی به اطلاعات مناسبی پیرامون انتخاب بهترین مکان و

بهترین اقلیم آب و هوایی گردد اما باید توجه داشت که مطالعات انجام گرفته برای داده های جمع آوری شده از سال ۲۰۲۰ میلادی می باشد لذا تغییر شرایط جوی و پارامتر های مربوطه می تواند نتایج فوق را دست خوش تغییر کند. است. با توجه به نتایج انتخاب یک شهر به عنوان بهترین گزینه امکان پذیر نیست اما به طور کلی می توان بر اساس شرایط و اهمیت هر یک از حوزه ها نسبت به احداث یا عدم احداث یک نیروگاه توربین بادی تصمیم گرفت.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله تعهد می¬نمایند که این مقاله حاصل دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و این مقاله یا بخشی از آن در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله تعهد می¬نمایند که هیچگونه تعارض منافعی بین هر یک از عوامل مشارکت¬کننده در تولید این مقاله (پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

سهم نویسندگان: امیرعلی سیف الدین اصل (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/سرپرستی علمی(۳۰ %)؛ سید فرحان موسویان (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقاله/بحث روی نتایج/تحلیلگر داده¬ها (۴۰ %)؛ احمد حاجی نژاد (نویسنده سوم)، پژوهشگراصلی/روش شناس/اعتبارسنجی و تطبیق نتایج (۳۰ %)

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

1- Sansaniwal SK, Sharma V, Mathur J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018;82:1576-601.
2- Zahedi R, Ahmadi A, Dashti R. Energy, exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analysis and optimization of quadruple combined solar, biogas, SRC and ORC cycles with methane system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;150:111420.
3- 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.
4- Zahedi R, Ahmadi A, Sadeh M. Investigation of the load management and environmental impact of the hybrid cogeneration of the wind power plant and fuel cell. Energy Reports. 2021;7:2930-9.
5- Farajzadeh M, Taghilo A. The wind energy potential zoning using GIS and fuzzy MCDM-based approach (study area: Zanjan province, Iran). The International Journal of Humanities. 2013;20(2):45-60.
6- European Wind Energy Association. The economics of wind energy. EWEA; 2009.
7- Ghasemi Bousejin MR, Mohtasebi SS. Numerical simulation of wind turbine in Manjil wind farm considering wind regime study. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(9):75-85.
8- Keramat Siavash N, Najafi GH, Tavakoli T, Ghobadian B, Mahmoodi E. Ducted wind turbine investigation in a wind tunnel. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(5):1297-305.
9- Farajzadeh M, Taghilo A. The wind energy potential zoning using GIS and fuzzy MCDM-based approach (study area: Zanjan province, Iran). The International Journal of Humanities. 2013;20(2):45-60.
10- Yaman K, Arslan G. Modeling, simulation, and optimization of a solar water heating system in different climate regions. Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2018;10(2):023703.
11- Hau E. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics. Springer Science & Business Media; 2013.
12- Friedman PD. Evaluating economic uncertainty of municipal wind turbine projects. Renewable Energy. 2010;35(2):484-9.
13- Li Z, Boyle F, Reynolds A. Domestic application of micro wind turbines in Ireland: Investigation of their economic viability. Renewable Energy. 2012;41:64-74.
14- Song D, Liu J, Yang J, Su M, Yang S, Yang X, Joo YH. Multi-objective energy-cost design optimization for the variable-speed wind turbine at high-altitude sites. Energy conversion and management. 2019;196:513-24.
15- Caglayan DG, Ryberg DS, Heinrichs H, Linßen J, Stolten D, Robinius M. The techno-economic potential of offshore wind energy with optimized future turbine designs in Europe. Applied energy. 2019;255:113794.
16- Schallenberg-Rodriguez J. A methodological review to estimate techno-economical wind energy production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013;21:272-87.
17- Uddin MS, Kumar S. Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique. Journal of cleaner production. 2014;69:153-64.
18- Wang S, Wang S, Liu J. Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. Journal of Cleaner Production. 2019;210:804-10.
19- Katinas V, Marčiukaitis M, Tamašauskienė M. Analysis of the wind turbine noise emissions and impact on the environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;58:825-31.
20- Ghobadian B, Najafi G, Rahimi H, Yusaf TF. Future of renewable energies in Iran. Renewable and sustainable energy reviews. 2009;13(3):689-95.
21- Bahrami M. Abbaszadeh p. An overview of renewable energies in Iran. Renew Sustain Energy Rev. 2013;24:198-208.
22- Marefati M, Mehrpooya M, Shafii MB. Optical and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids. Journal of cleaner production. 2018; 175:294-313.
23- 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.

24- Shabaniverki M, Shabaniverki H, Babapoor H. An Overview of Wind and Solar Energies in Iran.
25- Satkin M, Noorollahi Y, Abbaspour M, Yousefi H. Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014; 32:579-90.
26- Raziei T. Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century. Journal of the Earth and Space Physics. 2017; 43(2):419-39.
27- Ehyaei MA, Ahmadi A, Rosen MA. Energy, exergy, economic and advanced and extended exergy analyses of a wind turbine. Energy conversion and management. 2019; 183:369-81.
28- Powell WR. An analytical expression for the average output power of a wind machine. Solar Energy. 1981;26(1):77-80.
29- Asgari E, Ehyaei MA. Exergy analysis and optimisation of a wind turbine using genetic and searching algorithms. International Journal of Exergy. 2015;16(3):293-314.
30- Johnson GL. Wind energy systems: Electronic edition. KS, Manhattan. 2001 Dec.
31- Majidniya M, Gharali K, Raahemifar K. A Comparison of Off-Grid-Pumped Hydro Storage and Grid-Tied Options for an IRSOFC-HAWT Power Generator. International Journal of Rotating Machinery. 2017;2017.
32- Faizal M, Saidur R, Mekhilef S, Hepbasli A, Mahbubul IM. Energy, economic, and environmental analysis of a flat-plate solar collector operated with SiO 2 nanofluid. Clean Technologies and Environmental Policy. 2015;17(6):1457-73.
33- Caliskan H. Novel approaches to exergy and economy based enhanced environmental analyses for energy systems. Energy conversion and management. 2015;89:156-61.
34- Bhat IK, Prakash R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—a review. Renewable and sustainable energy reviews. 2009;13(5):1067-73.
35- Sovacool BK. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. Energy Policy. 2008;36(8):2950-63.
36- Caliskan H. Energy, exergy, environmental, enviroeconomic, exergoenvironmental (EXEN) and exergoenviroeconomic (EXENEC) analyses of solar collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;69:488-92.
37- Deniz E, Çınar S. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a solar desalination system with humidification-dehumidification. Energy Conversion and Management. 2016;126:12-9.
38- Den Elzen MG, Hof AF, Beltran AM, Grassi G, Roelfsema M, van Ruijven B, van Vliet J, van Vuuren DP. The Copenhagen Accord: abatement costs and carbon prices resulting from the submissions. environmental science & policy. 2011;14(1):28-39.
39- Saadon S, Gaillard L, Menezo C, Giroux-Julien S. Exergy, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of a building integrated semi-transparent photovoltaic/thermal (BISTPV/T) by natural ventilation. Renewable Energy. 2020;150:981-9.