J. Agric. Mech., 11 (1):43-54 (2026)

Journal of
Agricultural Mechanization

Online ISSN: 2717-4107
Journal homepage: https://jam.tabrizu.ac.ir/?lang=en

Original Article

An Overview of Wind Turbine Power Plants: Costs and Revenues, Optimal Layout, and Environmental Impacts

Abasalt Bazrafshan[1*], Hamidreza Ghassemzadeh[1], Arman Jalali[1]

1- Department of Biosystem Engineering , Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

***Keywords*:**

Wind Energy,

Wind Power Plant,

Wind Power Plant Layout,

Wind Power Plant Costs,

Wind Power Plant Environmental Impacts.

Received:
February 24, 2026

Revised:
June 07, 2026

Accepted:
June 09, 2026

*** Correspondingauthor:**

Abasalt.bazrafshan@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

The growing trend of the world population has brought about an inevitable increase in energy demand, and this issue, apart from the fact that non-renewable energy sources are finite, can bring about many environmental problems. Considering the importance of environmental impacts and the development of renewable energies, the construction of wind farms to absorb wind energy as one of the renewable energies is increasing all over the world. Wind is one of the important sources of energy that is clean, cheap, available and permanent. This article reviews wind power plants from their emergence and development and the research conducted in this field. One of the important factors is the economic analysis of the construction of a wind power plant, which is done by examining the investment and annual costs and the income from the power plant. Another important point in the construction of wind farms is the optimal arrangement of the farm, including the number of turbines and their arrangement, so that maximum energy production and efficiency are achieved with the lowest cost of connection between turbines. Finally, the environmental impacts of wind power plants were addressed, including the environmental impacts of electricity generation, the effects of wind turbine noise on noise annoyance, and the impact of wind power plants on air temperature.

Introduction

One of the solutions to energy shortages and dependence on non-renewable resources is to increase the use of renewable energy sources. In this regard, new energies, including hydropower, solar, and wind energies, are of particular importance because they do not pollute the environment. Wind energy has increased its presence in electrical power systems around the world in recent decades. Wind power plants have expanded more than any other existing technology for utilizing renewable resources in the power system due to their high efficiency, institutionalization of the technology used to exploit wind energy, low cost of electricity generation, presence of windy areas most of the time, and ability to generate power on a large scale and cost-effectively. On the other hand, the increasing technological progress of wind turbine manufacturing, which includes reducing the costs of designing and operating wind turbines, has forced countries around the world to use this energy more and more. Today, wind power (the conversion of wind energy into a useful form of energy such as electrical energy using wind turbines, mechanical energy, for example in windmills or wind pumps, or the propulsion of boats and ships, for example in sailboats) in the world has an annual production capacity of 430 TWh of electrical energy, which is 2.5% of the world's electricity consumption. The annual production capacity of electricity can be increased by expanding wind farms.

Literature review

How to cite:
Bazrafshan, A. Ghassemzadeh, H.R., and Jalali.A. (2026). *An Overview of Wind Turbine Power Plants: Costs and Revenues, Optimal Layout, and Environmental Impact.* Journal of Agricultural Mechanization, 11(1):43-54.
https://doi.org/10.22034/jam.2026.71662.1352

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Before building a wind farm, a financial and economic assessment is essential and critical. The economic assessment should be considered from both a national perspective and a power producer perspective. In the national economic assessment, the benefits of the wind farm project are compared with the costs of an alternative thermal power plant (e.g., a gas turbine), including fuel, repair, and maintenance costs. In the power producer economic assessment, the revenues are related to the present value of the electricity sales revenue over the life of the project.

One of the most important and complex issues in the construction of wind farms is the optimal number and arrangement of turbines in relation to each other in order to maximize energy production and efficiency. The arrangement and installation of turbines in the farm, given the limitations of land and capital, requires precise calculations in order to obtain the most energy from the power plant. The speed of the wind exiting the turbine decreases after passing through it and some of its energy is reduced. This phenomenon is called wake. This reduction in wind speed is a function of various factors such as distance, turbine dimensions and wind speed entering the turbine. Of course, this effect improves with distance, which is due to the general air currents in the area. Therefore, the denser the turbines in a power plant, the less wind is able to recover and as a result, the output power decreases.

Environmental studies conducted on wind energy show that the turbine production and wind power plant construction stage is a significant factor in greenhouse gas emissions in wind power plants, accounting for about 73-90% of the cumulative greenhouse gas emissions, and the remaining stages, including operation and maintenance, power plant demolition, and transportation, account for about 10-90%. Wind power plants, as one of the new methods of producing renewable energy with the least environmental impact compared to other energy sources, are considered one of the sources of noise pollution that have long attracted the attention of many researchers. Studies have examined the potential impacts of wind farms on global and local weather and climate. Modeling studies agree that wind farms can significantly influence local meteorology. In some cases, these effects may be beneficial, such as nighttime warming in stable conditions that can protect crops from frost.

Conclusion

This article aims to examine wind power plants and review the research conducted in this field. Wind is one of the clean, cheap, permanent and available renewable energy sources in the world. Many countries, including the United States and China, have made investments in this field and are making great use of this energy. Iran also has a number of wind farms, but as a country with many windy areas, if this energy source is used, it can provide a large part of its energy needs. There are important points to consider when constructing a wind power plant. The most important point is the economic analysis of constructing a wind power plant. At this stage, the investment and annual costs of the power plant are examined, and on the other hand, the income from the power plant, which includes the sale of electricity, is predicted. If it is economically viable, the wind power plant can be constructed. Another important point is the layout of the farm, which should consider the layout and number of turbines to produce the most energy for the least cost to connect the turbines. The next important point is the environmental impacts of wind power plants, both during the construction and operation stages, which should be minimized. These factors include the environmental impacts of electricity generation, the effects of wind turbine noise on noise nuisance, and the effects of the power plant on air temperature.

نشریه
مکانیزاسیون کشاورزی
شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: https://jam.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

مروری بر نیروگاه توربین بادی: هزینه‌ها و درآمدها، آرایش بهینه و اثرات زیست‌محیطی

اباصلت بذرافشان*[1]، حمیدرضا قاسم‌زاده[1]، آرمان جلالی[1]

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۱۲/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۰۳/۱۹

۱- گروه مهندسی بیوسیستم - دانشکده کشاورزی - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: Abasalt.bazrafshan@tabrizu.ac.ir

چکیده

روند رو به رشد جمعیت جهان، افزایش اجتناب ناپذیر تقاضای انرژی را به همراه داشته و این امر به غیر از پایان‌پذیر بودن منابع انرژی تجدیدناپذیر می‌تواند مشکلات فراوان زیست محیطی را به همراه داشته باشد. با توجه به اهمیت اثرات زیست محیطی و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، احداث مزارع بادی برای جذب انرژی باد به عنوان یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر دنیا در حال افزایش است. باد یکی از منابع مهم انرژی است که پاک، ارزان، دردسترس و همیشگی است. در این مقاله مروری بر نیروگاه‌های بادی از پیدایش و توسعه آن‌ها و پژوهش های انجام شده در این زمینه شد. یکی از عوامل مهم، تجزیه و تحلیل اقتصادی احداث نیروگاه بادی می‌باشد که با بررسی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سالیانه و درآمد حاصل از نیروگاه این تجزیه و تحلیل انجام می‌شود. نکته مهم دیگر در احداث مزارع بادی، آرایش بهینه مزرعه اعم از تعداد توربین‌ها و چیدمان آن‌ها می‌باشد به‌طوریکه حداکثر تولید و بهره‌وری انرژی با کمترین هزینه اتصال بین توربین‌ها انجام شود. در نهایت به اثرات زیست‌محیطی نیروگاه‌های بادی پرداخته شد که شامل اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته، اثرات صدای توربین بادی بر آزردگی صوتی و تاثیر نیروگاه بادی روی دمای هوا بود.

کلمات کلیدی: انرژی بادی، نیروگاه بادی، آرایش نیروگاه بادی، هزینه‌های نیروگاه بادی، اثرات زیست محیطی نیروگاه بادی.

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر، سرعت تخلیه این دست از انرژی‌ها را به‌دلیل افزایش اجتناب‌ناپذیر تقاضای جهانی انرژی تسریع می‌نماید. به غیر از پایان‌پذیر بودن انرژی‌های تجدیدناپذیر، با افزایش جمعیت کره زمین و تقاضای بیشتر برای انرژی، سایر مشکلات مرتبط با این منابع اعم از آلودگی هوا، بارش باران‌های اسیدی، گرم شدن کره زمین، تخریب لایه ازن، تخریب جنگل‌ها و انتشار مواد رادیواکتیو افزایش می‌یابد(Azarpour et al., 2013). یکی از راه‌حل‌های تامین انرژی و کاهش وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر، افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است. در این راستا انرژی‌های نو از جمله پتانسیل‌های آبی، انرژی‌های خورشیدی و بادی به‌دلیل عدم آلودگی محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند (Amani & Hosseini, 2009).

انرژی باد در دهه‌های اخیر حضور خود را در سیستم‌های تولید توان الکتریکی در سراسر جهان افزایش داده است. حضور این انرژی را می‌توان در جهانی که نیاز به مصرف انرژی بیشتر با بحران آب و هوایی در ارتباط است کاملا ضروری در نظر گرفت که این را می‌توان از طریق پدیده‌ای که به عنوان گرمایش جهانی شناخته می‌شود، مشاهده کرد (Bokde et al., 2019). به نظر می‌رسد در این واقعیت که انتشار گازهای گلخانه‌ای مسئول این بحران است توافق خاصی بین دانشمندان وجود دارد و این اعتقاد را تقویت می‌کند که نوع بشر باید تمام تلاش‌های ممکن را بر تولید انرژی از منابع غیر از سوخت‌های فسیلی متمرکز کند. انرژی باد یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر بوده و کشور ایران به عنوان کشوری دارای مناطق باد خیز فراوان، در صورت استفاده از منابع این انرژی، می‌تواند بخش عظیمی از انرژی‌های مورد نیاز خود را تامین کند (Motahary et al., 2014). بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت اسمی انرژی باد در کشور حدود ۶۰۰۰۰ مگاوات می‌باشد که میزان انرژی تولیدی تا ۱۸۰۰۰ مگاوات قابل استحصال است .این موضوع نشان دهنده‌ی پتانسیل بالای کشور در زمینه انرژی باد و به‌صرفه بودن سرمایه‌گذاری در این صنعت است (Aghahosseini et al., 2018).

افزایش قیمت منابع انرژی سنتی، وابستگی شدید بسیاری از کشورها به واردات آن‌ها و نیاز متعاقب آن به امنیت تأمین انرژی، منجر به سرمایه‌گذاری‌های کلان در ظرفیت‌های جدید نیروگاه‌های بادی شده است. اگرچه تولید انرژی بادی یک فناوری رشد کرده است و هزینه تراز شده الکتریسیته[1] آن پایین است، اما همچنان فضای کافی برای پیشرفت آن وجود دارد. به طور مثال، بهبود در آیرودینامیک پره‌های روتور، استفاده از مواد جدید و تولید پره‌های روتور بخش‌بندی‌شده (قطعه‌قطعه)[2] برای مواقعی که ساخت توربین‌های بادی با ابعاد بزرگ‌تر نیاز است، عواملی هستند که به منجر به افزایش توان تولیدی توربین‌ها می‌شوند. بهبود در نگهداری سیستم و تشخیص زودهنگام عیوب مربوط به انتقال نیرو و توان، و همچنین آسیب‌های سطحی پره، باعث کاهش زمان توقف[3] توربین‌های بادی و افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم می‌شود (Bošnjaković et al., 2022). اروپا، به عنوان منطقه پیشرو در جهان برای تولید توربین‌های بادی با تجربه گسترده در این زمینه، باید مسیر توسعه توربین‌های بادی و پیشرفت فناوری را ادامه دهد. طبق گزارش ایرنا[4] (آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر)، انتظار می‌رود ظرفیت کل مزارع بادی تا سال ۲۰۳۰ سه برابر و تا سال ۲۰۵۰ چهار برابر شود (IRENA, 2022).

در سال‌های اخیر نیروگاه‌های بادی بطور حیرت‌انگیزی از نظر اقتصادی با سایر نیروگاه‌ها قابل رقابت شده‌اند که دلائل آن عمدتا بشرح ذیل می‌باشد (Samai & Sadeghi, 2000):

- پیشرفت فزاینده تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی، که موجب کاهش هزینه‌های فرآیند ساخت شده است.
- هزینه‌های طراحی توربین‌های بادی بدلیل استاندارد شدن آن‌ها کاهش یافته است.
- هزینه‌های بهره‌برداری توربین‌های بادی به‌دلیل عدم نیاز به سوخت‌های فسیلی ، استهلاک پائین و خودکار بودن آن‌ها، بسیار کم شده و قابل مقایسه با هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاه‌های حرارتی نمی‌باشد.
- عدم آلودگی محیط زیست.
- امکان احداث در مناطق دوردست و صرفه اقتصادی در مقایسه با انواع دیگر نیروگاه‌ها، و امکان تامین انرژی توربین‌های بادی به‌صورت هیبرید با مولدهای خورشیدی و دیزلی.
- فراوان و دائمی بودن انرژی.

مطابق نشریه WMO[5] (سازمان هواشناسی جهانی وابسته به سازمان ملل) قدیمی‌ترین توربین بادی شناخته شده به‌نام Persian Vertical axis Wind mill (آسیاب بادی محور عمودی ایرانی) در ایران شناسایی شده است. این توربین همان آسیاب بادی است که در ایران خصوصا در مرز شرقی یعنی مسیر بادهای موسمی معمول بوده است، از این آسیاب‌ها عمدتا برای آرد کردن گندم و کشیدن آب از چاه استفاده می‌شد. در حال حاضر نمونه های بر جای مانده از آسیاب‌های بادی روستاهای ابرش و دهسرخ در مجاورت دشت دیزباد،

[1] levelized cost of electricity
[2] segmented rotor blades
[3] Downtime
[4] International Renewable Energy Agency
[5] World Meteorological Organization

خشت و کلات نادری و ده‌ها روستای دیگرقابل رویت و بازدید است. در قرن ۱۴ میلادی هندی‌ها کوشش فراوانی برای اصلاح آسیاب‌های بادی به‌عمل آوردند، و از آن‌ها برای خشک کردن باتلاق استفاده فراوانی بردند. در سال ۱۵۸۶ میلادی اولین آسیاب بادی در هلند به منظور ساختن کاغذ برپا شد.تا نیمه قرن ۱۹ بیش از شش میلیون آسیاب بادی با قدرت کمتر از یک اسب بخار در امریکا ساخته شد. در اواخر قرن ۱۹ در حدود ۳۰۰۰ آسیاب بادی برای امور صنعتی و حدود ۳۰۰۰۰ دیگر برای استفاده در منازل و مزارع جمعا به قدرت ۲۰۰ مگاوات در دانمارک مشغول به‌کار بودند. با پیشرفت تکنولوژی در قرن اخیر و بخصوص توفیقی که در طرح ساخت انواع پره‌های توربین بادی طبق اصول آئرودینامیکی پدید آمد، آسیاب‌های بادی قدیمی مورد بررسی علمی قرار گرفت و منجر به بوجود آمدن توربین‌های بادی با قدرت ۱۰۰ KW و بیشتر گردید. در سال ۱۹۳۱ توسط روس‌ها توربین پیشرفته‌ای با قدرت ۱۰۰ KW ساخته شد و در کنار دریای سیاه نصب گردید. در دهه ۱۹۳۰ در آمریکا توربین بادی ۱/۲۵ MW طراحی شد تا به شبکه موجود برق بدهد. در دهه ۱۹۵۰ توربین بادی با قدرت ۱۰۰ KW در یکی از جزیره‌های اسکاتلند شمالی به‌کار رفت. پس از بحران انرژی از سال حدود ۱۹۷۳ کار تحقیق و ساخت توربین‌های بادی با شتاب بیشتری ادامه یافت، به‌گونه‌ای که ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی جهان از ۵۵۰۰ MW در اواسط سال ۱۹۹۶ به حدود ۸۰۰۰ MW در اوایل سال ۱۹۹۸ رسیده که خود حاکی از یک روند رو به رشد سریع در ارتباط با استفاده از انرژی باد است (Shamsabadi, 2000; Hosseini & Forouzbakhsh, 2004).

نیروگاه‌های بادی به‌دلیل بازدهی بالا، نهادینه شدن فناوری مورد استفاده برای بهره‌برداری از انرژی باد، ارزان تمام شدن قیمت برق تولیدی، وجود مناطقی با وزش باد در اکثر اوقات و همچنین قابلیت تولید توان در مقیاس بزرگ و باصرفه بودن، بیش از هریک از فناوری‌های موجود برای بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر در سیستم تولید توان گسترش یافته است. از طرفی پیشرفت فزاینده تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی که شامل کاهش هزینه‌های طراحی و بهره برداری توربین‌های بادی شده است، کشورهای جهان را به استفاده هرچه بیشتر از این انرژی شوق داده است. امروزه توان بادی (تبدیل انرژی باد به نوعی مفید از انرژی مانند انرژی الکتریکی با استفاده از توربین‌های بادی، انرژی مکانیکی مثلاً در آسیاب‌های بادی یا پمپ‌های بادی و یا پیش رانش قایق‌ها و کشتی‌ها مثلاً در قایق‌های بادبانی) در دنیا ظرفیت تولید سالانه ۴۳۰ تراوات انرژی الکتریکی را دارد که این میزان ۵/۲ درصد مصرف برق دنیا است که با گسترش مزرعه بادی می‌توان ظرفیت تولید سالانه برق را افزایش داد (Fokaides et al., 2014).

در ادامه، به موارد قابل توجه در احداث و بررسی نیروگاه بادی که شامل بررسی اقتصادی نیروگاه‌های بادی، بهینه‌سازی آرایش آن‌ها و در نهایت اثرات زیست‌محیطی آن‌ها بررسی شد.

۲- مرور ادبیات

۲-۱- تجزیه و تحلیل اقتصادی احداث نیروگاه‌های بادی

قبل از ساخت یک نیروگاه بادی، ارزیابی اقتصادی امری ضروری و حساس است. ارزیابی اقتصادی از دیدگاه ملی و دیدگاه تولید کننده برق بایستی مورد بررسی قرار گیرد. در ارزیابی اقتصادی از دیدگاه ملی، منافع طرح نیروگاه بادی با هزینه‌های نیروگاه حرارتی جایگزین (مثلا توربین گاز) شامل هزینه‌های سوخت، تعمیرات و نگهداری مقایسه می‌شود .در ارزیابی اقتصادی از دیدگاه تولیدکننده برق، درآمدهای مربوط به ارزش حال درآمد فروش برق در طی عمر پروژه است.

۲-۱-۱- هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سالیانه

هزینه های سرمایه گذاری و سالیانه پروژه شامل شش بخش زیر می‌باشد (Hosseini & Forouzbakhsh, 2004):

۱. **هزینه‌های تجهیزات الکترومکانیکی:** این هزینه‌ها شامل خرید توربین، نصب و مونتاژ، حمل و نقل تجهیزات و هزینه‌های گمرکی است، که بستگی به ظرفیت و نوع توربین‌های مورد نظر و همچنین بستگی به شرائط جغرافیائی و توپوگرافی محل دارد.

۲. **هزینه‌های ساخت دکل:** نوع دکل می‌تواند مشبک [1]یا لوله‌ای [2]باشد. به‌دلیل ارزان بودن و امکان ساخت راحت‌تر در کشور نوع اول در نظر گرفته می‌شود.

۳. **هزینه های ساختمانی:** شامل هزینه‌های فونداسیون، آماده سازی زمین و ایجاد جاده دسترسی است . که با توجه به شرائط منطقه تعیین می‌گردد.

٤. **هزینه‌های انتقال نیرو:** هزینه‌های انتقال شامل هزینه‌های خط انتقال و تجهیزات پست مورد نیاز برای انتقال توان تولید شده به شبکه می‌باشد . هزینه انتقال بستگی به منطقه پروژه ، نوع سامانه موجود ، بزرگی و نوع نیروگاه بادی دارد. طبیعی است هر چه پروژه به شبکه انتقال نزدیک‌تر باشد هزینه انتقال کمتر خواهد بود.

۵. **هزینه‌های غیرمستقیم:** این هزینه‌ها شامل هزینه‌های طراحی و مهندسی پروژه، نظارت، مدیریت و در نظر گرفتن نرخ بهره و تورم در طول ساخت می‌باشد.

[1] Lattice

[2] Tublar

٦. **هزینه‌های سالیانه:** این هزینه‌ها عبارتند از استهلاک سرمایه، بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری . این هزینه‌ها برای توربین‌های بادی در مقایسه با سایر نیروگاه‌ها بسیار کم است.

۲-۱-۲- فواید و درآمدهای حاصل از پروژه

برای نیروگاه بادی درآمد شامل فروش جریان الکتریکی تولید شده است (Hosseini & Forouzbakhsh, 2004). باتوجه به خرید برق توسط وزارت نیرو با قیمت بالاتر (حدود دو برابر نسبت به بار عادی و سه برابر نسبت به کمباری)، میتوان برنامه‌ریزی بهره‌برداری را طوری ترتیب داد که بیشترین فایده حاصل گردد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که مشخصه اصلی اقتصادی این نیروگاه‌ها، حجم سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً زیاد و هزینه‌های جاری بسیار کم آن است. قیمت برق تمام شده این نیروگاه‌ها پس از تاثیر هزینه‌های استهلاک سرمایه، بازپرداخت اقساط سالیانه، تعدیل هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری با قیمت نیروگاه‌های سوخت فسیلی (دیزلی و گازی و حرارتی) قابل رقابت است.

۲-۲- آرایش بهینه توربین‌های بادی

یکی از مسائل پراهمیت و پیچیده در احداث مزارع بادی، بحث تعداد بهینه و چیدمان مناسب توربین‌ها نسبت به یکدیگر به منظور به حداکثر رساندن تولید انرژی و بهره‌وری است. نحوه چیدمان و نصب توربین‌ها در مزرعه با توجه به محدودیت زمین وسرمایه، به محاسبات دقیقی نیاز دارد تا بتوان بیشترین انرژی را از نیروگاه بدست آورد. سرعت باد پس از عبور از توربین بادی کاهش می‌یابد، زیرا بخشی از انرژی جنبشی باد توسط توربین استخراج و به انرژی مکانیکی و سپس الکتریکی تبدیل می‌شود. ناحیه‌ای با سرعت کمتر و آشفتگی بیشتر در پشت توربین ایجاد می‌شود که به آن «اثر وِیک»[1] گفته می‌شود. این کاهش در سرعت باد تابعی از عوامل مختلف نظیر فاصله، ابعاد توربین و سرعت باد ورودی به توربین است. البته این تاثیر با ایجاد فاصله بیشتر بین توربین‌ها بهبود می‌یابد که ناشی از جریانات عمومی هوا در منطقه است. از این رو هرچه توربین‌های موجود در یک نیروگاه متراکم‌تر باشند، باد فرصت کافی برای بازیابی سرعت و یکنواختی خود را پیدا نمی‌کند و در نتیجه توان خروجی کاهش پیدا می‌کند. توان موجود در باد یا توان گرفته شده از یک توربین بادی از رابطهٔ (۱) به دست می آید:

$$P=\frac{1}{2}\rho A V^3 \qquad (1)$$

که در آن P توان خروجی توربین برحسب وات، ρ چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، پارامتر A نیز ناحیه‌ای که در معرض باد قرار می‌گیرد (برحسب متر مربع) که به شعاع پره‌های توربین وابسته است. همچنین V سرعت باد برحسب متربر ثانیه می‌باشد.

براساس مدل جنسن[2] (Jensen, 1983)، سرعت باد برای توربین‌های بالادست بعد از عبور باد آزاد از توربین‌های پایین دست از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$V_x=V_{in}\left[1-(1-\sqrt{1-c_t})(d/d_x)^2\right] \qquad (۲)$$

که در آن V_{in} سرعت باد آزاد که همان سرعت باد در هنگام عبور از توربین پایین دست و V_x سرعت باد به هنگام ورود به توربین بالادست برحسب متربر ثانیه است. d قطر صفحه چرخش توربین پایین دست و d_x قطر توربین بالادست. c_t ضریب نیروی پیشران[3] نام دارد و برای هر توربین بادی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Blair et al., 2014):

$$C_t= -A+ B C_P + C C_P^2 + D C_P^3$$

که A، B، C و D ضرایب ثابت هستند و برابرند با:

$A = - 0.01453989$
$B = 1.473506$
$C = - 2.330823$
$D = 3.885123$

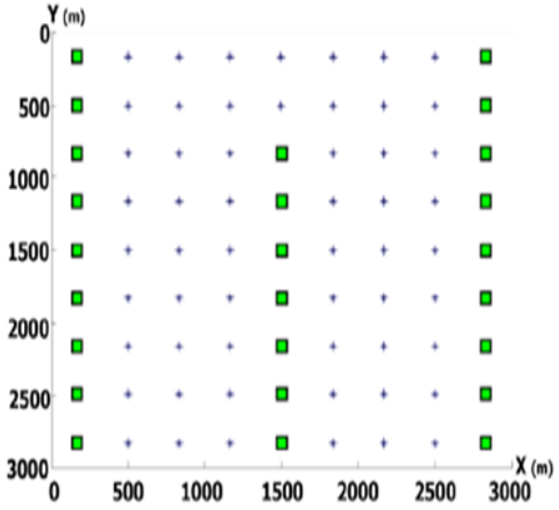
C_P ضریب قدرت نامیده می‌شود و طبق تعریف، درصدی از انرژی باد است که به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. در حالت ایده‌آل و ماکزیمم این ضریب برابر با ۰/۵۹۳ است.

از این رو اهداف و قیود متفاوتی برای بررسی این موضوع در مقالات مختلف مد نظر بوده است. این کار در ابتدا یک مدل شبیه سازی توسط مستی و همکاران بر اساس برهم‌نهی و الگوریتم ژنتیک ارائه شد (Mosetti et al., 1994). در این مدل سه حالت باد مختلف، یعنی تک جهت، شدت ثابت با جهت متغیر و شدت متغیر با جهت متغیر مورد بررسی قرار گرفت. Grady et al (2005) نیز از الگوریتم های ژنتیک برای به‌دست آوردن موقعیت بهینه توربین بادی استفاده کردند و نتایج را بهبود داده‌اند. Marmidis et al (2008) نیزکار قابل توجهی انجام دادند که در آن یک رویکرد کاملا متفاوت، شبیه‌سازی مونت کارلو، برای تعداد بهینه و قرارگیری توربین‌های بادی دنبال شده است. Wan et al (2012) از فضای جست وجوی پیوسته برای تعیین آرایش بهینه مزرعه استفاده کرده‌اند. این بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم تجمع ذرات باهدف بیشینه کردن انرژی خروجی مزرعه صورت گرفته است. Ekonomou et al (2012) یک مدل شبکه عصبی مصنوعی به منظور تخمین تعداد بهینه توربین‌های بادی و کل توان تولیدی در یک مزرعه بادی پرداخته‌اند.Aghajani et al (2015) با رویکردی متفاوت به

[1] Wake effect
[2] Jensen
[3] Thrust Coefficient

مکان‌یابی توربین‌ها از دیدگاه ایمنی و امن از سروصدا وتأثیرات زیست محیطی با معیارهای زیست‌محیطی مدل‌شده با منطق فازی پرداخته‌اند.

Beheshtiya & Gazaneh (2016) از الگوریتم ژنتیک اجتماعی برای بهینه سازی آرایش توربین‌ها استفاده کردند. آن‌ها به تعیین آرایش توربین‌ها با هدف بیشینه سازی توان خروجی و کمینه سازی هزینه اتصال توربین‌ها به یکدیگر پرداختند. هدف، تعیین مکان ۲۵ دستگاه توربین بادی در مزرعه مورد نظر است. توربین‌های بادی از نوع Nordex N80-2500 با توان نامی[1] (ظرفیت) ۲۵۰۰ کیلووات استفاده شده است که حداقل سرعت باد ورودی مورد نیاز برای کارکرد آن ۳ متر بر ثانیه، حداکثر سرعت باد مورد نیاز برای کارکرد آن ۱۹ متر بر ثانیه و قطر مرکز گردان توربین ۸۰ متر است. حداکثر سرعت نوک پره[2] ۳۸ متر بر ثانیه و میزان حداکثر سرعت نوک پره به سرعت باد برابر ۵ است. در نهایت آن‌ها با بررسی استقرارهای مختلف به مدل بهینه توسط الگوریتم ژنتیک اجتماعی برای یک مزرعه ۳۰۰۰×۳۰۰۰ متر در منطقه کوهستانی ساکرامنتو در ایالت کالیفرنیا آمریکا، دست یافتند که مطابق شکل (۱) می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت قرارگیری توربین‌ها در نیروگاه برای دستیابی به مینیمم هزینه و ماکزیمم توان براساس الگوریتم ژنتیک اجتماعی

Fig 1. Positioning of turbines in a power plant to achieve minimum cost and maximum power based on social genetic algorithm

با توجه به این موضوع که توربین‌های بادی ارتفاع بالایی دارند، اغلب مورد برخورد صاعقه قرار می‌گیرند. بنابراین نرخ وقوع بالای صاعقه در کنار مقاومت بالای خاک، می‌تواند تاثیر منفی روی عملکرد انفرادی و گروهی توربین‌های بادی داشته باشد (Alam& Sood, 2020). از این رو مورد توجه قرار دادن این نکته هنگام آرایش توربین‌ها مهم است. Shirmohamadi & Shariatinasab (2025) به بررسی روش‌های حفاظت شبکه کابل‌های جمع‌آوری در مزارع بادی در برابر ضربات مستقیم صاعقه پرداختند. در این مطالعه، نقش آرایش توربین‌های بادی در عملکرد حفاظتی شبکه کابل مورد توجه قرار گرفته است. همچنین پیکربندی‌های مختلف اتصال غلاف و سیستم‌های زمین بررسی شده و تأثیر آن‌ها بر رفتار شبکه در هنگام وقوع صاعقه تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مناسب روش اتصال و زمین‌کردن غلاف کابل، همراه با در نظر گرفتن آرایش مزرعه بادی، می‌تواند نقش مهمی در کاهش تنش‌های ناشی از صاعقه و افزایش قابلیت اطمینان شبکه کابل‌های جمع‌آوری در مزارع بادی داشته باشد.

۲-۳- اثرات زیست محیطی نیروگاه بادی

۲-۳-۱- اثرات زیست محیطی تولید الکتریسیته

در سال‌های اخیر با استفاده از دانش بومی به تولید فناوری‌ها و تجهیزات مختلف نیروگاه‌های بادی (تولید ژنراتورها، ناسل[3] (محفظه تمامی اجزای تولیدکننده برق در یک توربین بادی)، برج و غیره) پرداخته شد. یکی از دغدغه‌های مهم در این نیروگاه‌ها، میزان اثرات زیست محیطی ناشی از تولید انرژی الکتریکی با استفاده فناوری‌های بومی می‌باشد.

بررسی‌های زیست محیطی انجام شده در مورد انرژی باد نشان می‌دهد که مرحله‌ی تولید توربین و ساخت نیروگاه بادی، عامل مهم انتشار گازهای گلخانه‌ای در نیروگاه‌های بادی می‌باشد که درصد انتشار تجمعی گازهای گلخانه‌ای در حدود ۷۳-۹۰ درصد و بقیه مراحل که شامل بهره‌برداری و نگهداری، تخریب نیروگاه، حمل و نقل حدود ۱۰- ۲۸ درصد را به خود اختصاص می‌دهد (Joseph et al., 2000).

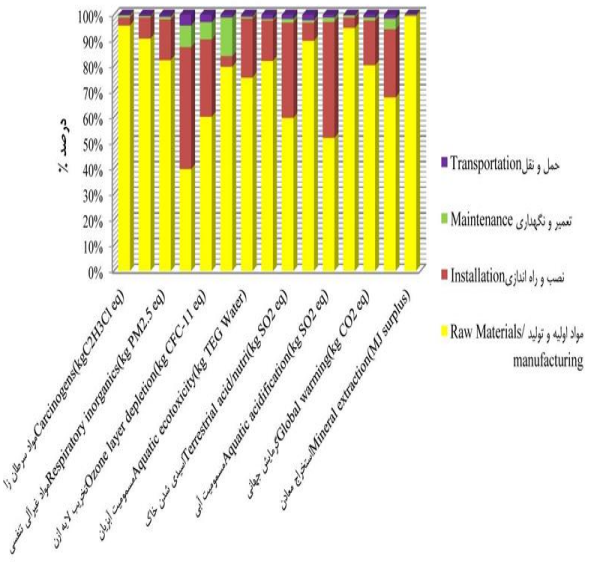
ارزیابی چرخه حیات یک روش مفید برای ارزیابی کمی اثرات زیست‌محیطی در طی یک فرایند، تولید یک محصول یا تکنولوژی، در سراسر مراحل مختلف چرخه حیات است که شامل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل ورودی‌ها، خروجی‌ها و پیامدهای بالقوه زیست محیطی است (Standardization, 2006). اثرات زیست محیطی ناشی از تولید انرژی با استفاده از باد، توجه زیادی را در جهان به خود جلب کرده و به‌دلیل ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی توسط ارزیابی چرخه حیات، به طور گسترده از این روش در ارزیابی زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Bidstrup, 2015). Zare & Nisari (2016) در پژوهشی به بررسی اثرات زیست‌محیطی توربین‌های بادی ۲ مگاواتی دارای ژنراتورهای دو سویه القایی مدرن (که بیشترین استفاده را در مزارع بادی دارند) پرداختند. بر این اساس، یک ارزیابی چرخه زیستی گسترده روی توربین باد اجرا شد که تمام مراحل ساخت تا برچیدن و فرآوری ضایعات در پایان عمر مفید آن را پوشش میداد. نتایج نشان

[1] Rated Power
[2] Max Tip Speed
[3] Nacelle

داد که آلودگی دی اکسیدکربن بر کیلووات ساعت الکتریسیته تولید شده با افزایش توان نامی توربین کاهش می‌یابد، این امر ناشی از سرشکن شدن اثرات زیست‌محیطی مراحل ساخت، نصب و پایان عمر در مقدار بیشتری از برق تولیدی است. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر آلودگی و اثرات زیست‌محیطی این انرژی، بسیار کمتر از سایر منابع تولید الکتریسیته است. Teffera et al (2021) اثرات زیست‌محیطی یک مزرعه بادی در کشور اتیوپی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که متوسط شاخص گرمایش جهانی در هر کیلووات ساعت الکتریسیته تولید شده، برای تغییرات آب و هوایی 33.6 g CO_2 eq (۳۳.۶ گرم معادل دی‌اکسید کربن) بود. مقادیر تقاضای انرژی تجمعی (CED[1]) و بازگشت انرژی (EROI[2]) برای سیستم انرژی بادی به ترتیب ۰/۳۹۳ MJ و ۹/۲ بود. Li et al (2020) در پژوهشی به تجزیه و تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید الکتریسیته از انرژی باد و ذغال سنگ در چین پرداختند. نتایج نشان داد که به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی الکتریسیته، انرژی باد تنها ۴٪ از کل میزان انتشار دی اکسید کربن و هزینه‌های زیست‌محیطی مربوط به ذغال سنگ را ایجاد می‌کند. Moore (2021) در پژوهشی دیگر به ارزیابی اثرات زیست محیطی تولید انرژی از باد و ذغال سنگ پرداخت. نتایج نشان داد که تولید انرژی با استفاده از باد اثرات زیست محیطی کمتری نسبت به انرژی ذغال سنگ دارد. با این حال، نتایج نشان داد که تولید انرژی از باد به زمینی با مساحت بسیار بیشتر از انرژی ذغال سنگ نیاز دارد. Alsaleh & Sattler (2019) در پژوهشی به ارزیابی چرخه حیات[3] ۲۰۰ توربین بادی (خرید مواد، ساخت، حمل و نقل، نصب، بهره‌برداری و نگهداری و پایان زندگی) مدل Gamesa 2-MW در تگزاس امریکا پرداختند. نتایج نشان داد که مرحله تولید توربین بیشترین اثرات زیست‌محیطی را نسبت به بقیه مراحل داشت. بررسی‌ها برای یک عمر ۲۰، ۲۵ و ۳۵ ساله نشان داد که توربین‌ها به ترتیب ۳/۴، ۴/۲ و ۵/۱ برابر بیشتر از انرژی مصرفی می‌توانند تولید انرژی داشته باشند، این نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان و طولانی تر شدن عمر بازده بالاتر می‌رود زیرا برخی انرژی‌های مصرفی مانند انرژی ساخت فقط در مراحل اولیه انجام می‌شوند و در چرخه حیات تکرار نمی‌شوند.

Nowroozipour et al (2023) در مطالعه‌ای دیگر در ایران به ارزیابی چرخه حیات نیروگاه‌های بادی از مراحل احداث تا بهره‌برداری، در دو نیروگاه بادی واقع در کهک شهرستان قزوین و آقکند شهرستان میانه پرداخته‌اند. ارزیابی ۱۵شاخص میانی زیست‌محیطی در روش IMPACT2002+ برای تولید یک کیلووات انرژی الکتریسیته در نیروگاه‌های بادی آقکند و کهک نشان داد که اکثر این شاخص‌ها (به جز تابش یونیزه) به شدت تحت تاثیر تولید مواد اولیه هستند.

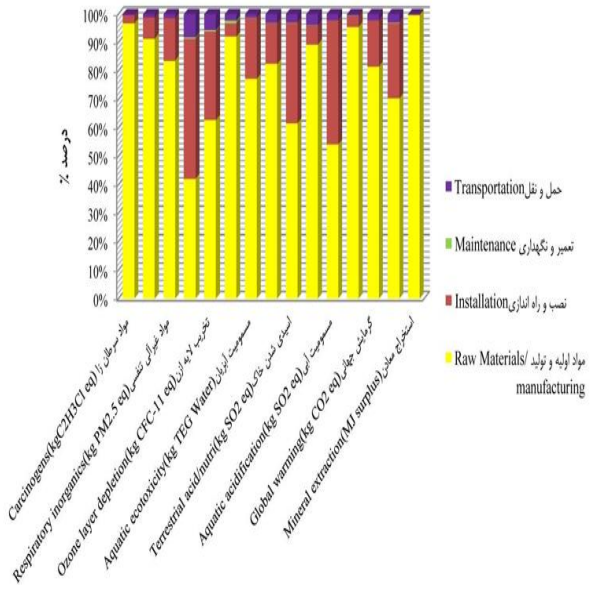
همچنین بررسی‌ها نشان داد که نصب و راه‌اندازی دومین عامل ایجاد آلاینده‌های زیست‌محیطی بود (شکل۲ و ۳). یکی از دلایل مهم اثرگذار بودن تولید مواد اولیه برای راه‌اندازی نیروگاه‌ها در ایجاد شاخص های مختلف، استفاده بسیار زیاد از عناصری مانند فولاد، مس و غیره می‌باشد. بررسی شاخص تابش یونیزه نیز نشان داد که استفاده از سوخت دیزل در مرحله نصب در هر دو نیروگاه مورد بررسی بالاترین میزان انتشارات را به همراه داشت به طوری که سهم انتشارات آلاینده‌ها در مرحله مواد اولیه و تولید بیش از ۴۰ درصد و در مرحله نصب به‌دلیل مصرف سوخت دیزل بیش از ۴۸ درصد بود. نتایج نشان داد مرحله نصب تجهیزات در نیروگاه آقکند ۱۷٪ و در نیروگاه کهک ۱۶٪ در ایجاد تغییرات آب و هوایی و بین ۱۴ تا۲۶٪ در ایجاد سایر گروه‌های زیست‌محیطی اثر گذار بود. مرحله‌ی تعمیر و نگهداری شامل رانندگی بین توربین‌ها دو بار در سال برای روان‌کاری، تعویض قطعات و بازرسی آن‌ها می‌شود، که اثرات آن برای همه دسته‌ها کمتراز ۸٪ در هر دو نیروگاه محاسبه شد. مرحله‌ی حمل ونقل به دلیل مصرف سوخت دیزل، در نیروگاه آقکند ۳٪ و نیروگاه کهک ۶٪ به تخریب لایه ازن کمک می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که مرحله استخراج مواد اولیه و تولید در دو نیروگاه حدود ۷۰ ٪ در ایجاد انواع اثرات تنفسی، ۶۰ ٪ در ایجاد پتانسیل سلامتی انسان و ۲۵ ٪ در ایجاد گروه‌های اسیدی شدن و گرم شدن کره زمین اثرگذار بود.



شکل ۲- سهم اثرات زیست محیطی در تولید الکتریسیته نیروگاه بادی آقکند درطول عمر ۲۰ سال

Fig 2. Contribution of environmental impacts to electricity production of Aqkand wind power plant over a 20-year lifespan

[1] Cumulative Energy Demand
[2] Energy Return on Investment
[3] Life Cycle Assessment



شکل ۳- سهم اثرات زیست محیطی در تولید الکتریسیته نیروگاه کهک در طول عمر ۲۰ سال

Fig 3. Contribution of environmental impacts to electricity production of the Kahak Power Plant over its 20-year lifespan

نکته: در شکل‌های ۲ و ۳ در محور افقی شاخص‌ها ۱۵ مورد می‌باشند که از چپ به راست عبارتند از: مواد سرطان‌زا، مواد غیرسرطان‌زا، مواد غیرآلی تنفسی، تابش یونیزه، تخریب لایه ازن، اثرات تنفسی، مسمومیت آبزیان، مسمومیت زمین، اسیدی شدن خاک، اشغال اراضی، مسمومیت آبی، اتروفیکاسیون، گرمایش جهانی، مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر و استخراج معادن.

۲-۳-۲- اثرات صدای توربین بادی بر آزردگی صوتی

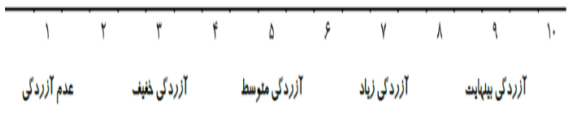
نیروگاه‌های بادی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین تولید از انرژی‌های تجدیدپذیر با کمترین آثار زیست‌محیطی در مقایسه با سایر منابع انرژی، یکی از منابع الودگی صوتی به حساب می‌آیند که از دیرباز مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند.

باعبور جریان هوا از مجاورت پره‌های توربین‌های بادی و ایجاد جریان متلاطم هوا، تراز بالایی از صدا تولید می‌گردد که ماهیتی کم فرکانس دارد. ویژگی‌هایی از صدا از قبیل محتوای فرکانسی آن یکی از عوامل تعیین کنندهٔ آثار صدا می‌باشد، به گونه ای که صدای کم فرکانس ناشی از توربین های بادی آلودگی صوتی بیشتری ایجاد می‌کند (Doolan et al., 2012; Nobbs et al., 2012).

Erickson (2013) در مطالعه‌ای بیان کرد که توربین‌های بادی در مکان‌هایی که افراد در مجاورت آن‌ها قرار دارند می‌تواند برای سلامت این افراد مضر باشد. آثاری چون حالت تهوع، سرگیجه، وزوز گوش، تپش قلب، استرس، فشار خون، اختلال خواب و آزردگی که در مواجهه با صدای توربین‌های بادی در بعضی از ساکنان اطراف نیروگاه‌های بادی به وجود آمده است سبب نگرانی افراد در ارتباط با نصب و راه‌اندازی توربین بادی شده است (Nissenbaum et al., 2012; Pierpont (2009). عوارض بهداشتی ناشی از توربین‌های بادی را به عنوان سندروم توربین‌های بادی نامگذاری و بیان کرد که دلیل ایجاد این مشکلات می‌تواند ناشی از صدای کم فرکانس منتشره از توربین‌های بادی باشد. Janssen et al (2011) بیان می‌کنند که آلودگی صوتی ناشی از توربین‌های بادی از آلودگی ناشی از منابع محیطی صوت از قبیل صدای ترافیک جاده‌ای و ریلی بیشتر است.

Abbasi et al (2015) در پژوهشی در ایران اثر صدای توربین‌های بادی بر آزردگی صوتی شاغلان نیروگاه بادی منجیل را بررسی کردند. برای این منظور، شاغلان نیروگاه بادی در سه گروه تعمیرات، حراست و اداری بررسی شده و تراز معادل صوت برای هر یک از گروه‌ها براساس استاندارد ایزو ۹۶۱۲ اندازه‌گیری شد (ISO, 2009). میزان آزردگی صوتی افراد با استفاده از روش ایزو ۱۵۶۶۶ تعیین شده است (ISO/TS, 2003). براساس نتایج، میانگین آزردگی صوتی افراد به‌دست آمد و تعمیرکاران نسبت به دو گروه دیگر آزردگی صوتی بیشتری داشتند. میانگین سن و سابقهٔ کار افراد به ترتیب ۳۰/۸ و ۱۴/۱ سال بود وافرادی با سن وسابقهٔ کار بیشتر، آزردگی صوتی بیشتری را تجربه کردند. همچنین صدا، سن و سابقهٔ کار ارتباط مثبت و معناداری با آزردگی صوتی داشت. نتایج رگرسیون چندگانه نشان داد که تاثیر مواجه صوتی بر آزردگی شاغلان از تأثیر سن بیشتر است. براساس یافته‌های این پژوهش، میانگین آزردگی صوتی شاغلان ۶ به دست آمد که بیانگر آزردگی زیاد می‌باشد. همچنین ۳۲ درصد افراد آزردگی صوتی ۸ و بیشتر را گزارش کردند که نشان دهنده آزردگی بیش از حد در آن‌ها است.

آزردگی صوتی افراد براساس پرسشنامه اکوستیک – ارزیابی آزاردهندگی صوت با استفاده از ممیزی اجتماعی و اجتماعی-اکوستیکی تعیین می‌شود که در استاندارد ایزو ۱۵۶۶۶ موجود می‌باشد. این مقیاس اعداد صفر تا ۱۰ را در برمی‌گیرد که صفر بیانگر عدم آزردگی و عدد ۱۰ نیز آزردگی بیش از حد را نشان می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۴- نمودار محدوده آزردگی شاغلان

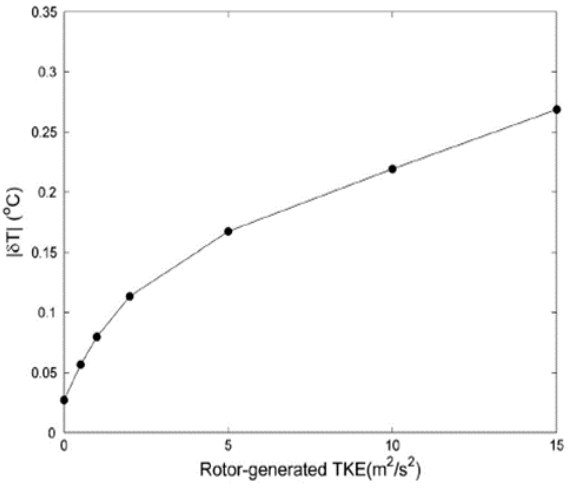
Fig 4. Chart of employee annoyance levels

۱-۱-۲- تاثیر نیروگاه بادی روی دمای هوا

مطالعاتی، تأثیرات مزارع بادی را بر آب و هوا و اقلیم جهانی و محلی بررسی کرده است. مطالعات مدل سازی به این نتیجه دست یافتند که مزارع بادی می‌توانند به طور قابل توجهی بر آب و هوای محلی تأثیر بگذارند (Baidya et al., 2004; Adams & Keith, 2007). در برخی موارد، این اثرات ممکن است مفید باشد، مانند گرم شدن شبانه که در شرایط پایدار می تواند محصولات را از یخزدگی

محافظت کند. اگر مزارع بادی به اندازه کافی بزرگ باشند، ممکن است هواشناسی سطح پایین دست را نیز تحت تأثیر قرار دهند (Kirk-Davidoff & Keith, 2008).

Baidya & Traiteur (2010) تاثیری که استفاده از توربین‌های بادی روی دمای هوا می‌گذارد را در مزرعه بادی در سن گورگونیو، کالیفرنیا بررسی کردند. داده‌های میدانی نشان داد که دمای هوای نزدیک به سطح زمین در جهت باد مزرعه بادی، در طول شب و ساعات اولیه صبح بیشتر از مناطق خلاف جهت باد است، در حالی که عکس آن برای بقیه روز صادق است. بنابراین، این مزرعه بادی در طول شب اثر گرمایی و در روز اثر خنک کنندگی دارد. در اتمسفر پایدار، زمانی که میزان لغزش مثبت است، یعنی یک لایه گرم روی یک لایه خنک قرار می‌گیرد، اختلاط عمودی تقویت شده هوای گرم را به سمت پایین و هوای سرد را به بالا مخلوط می کند و منجر به گرم شدن نزدیک سطح می‌شود. در یک جو ناپایدار با نرخ افت منفی، یعنی هوای خنک که روی هوای گرمتر قرار دارد، جریان‌های متلاطم، هوای خنک را با هم مخلوط می‌کنند و هوای گرم را بالا می‌برند و خنکی در نزدیکی سطح ایجاد می‌کنند. شکل ۵ نشان می‌دهد که روتورهایی که تلاطم بیشتری در دنباله خود ایجاد می‌کنند احتمالاً تأثیر قوی‌تری بر دمای هوای نزدیک به سطح خواهند داشت. در نتیجه، روتورهایی که تلاطم بیشتری را در دنباله خود ایجاد می‌کنند، انرژی جنبشی موجود برای توربین‌های پایین دست را بیشتر کاهش می‌دهند. بنابراین، طراحی روتورهای جدید که تلاطم کمتری در پی خود ایجاد می‌کنند، بهره‌وری مزارع بادی را نیز افزایش می‌دهد.



شکل ۵- تأثیر تلاطم بر مزارع بادی و تغییر دمای هوای نزدیک به سطح در مزرعه بادی

Fig 5. The effect of turbulence on wind farms and the change in near-surface air temperature at the wind farm

۳- نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف بررسی نیروگاه‌های بادی از دیدگاه اقتصادی، آرایش بهینه و محیط‌زستی و مروری بر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه صورت گرفت. باد یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر پاک، ارزان، همیشگی و دردسترس می‌باشد که در جهان وجود دارد. کشورهای زیادی از جمله آمریکا و چین سرمایه‌گذاری‌های در این زمینه انجام داده و بهره‌برداری‌های زیادی از این انرژی انجام می‌دهند. همچنین کشور ایران دارای تعدادی مزارع بادی می‌باشد اما به عنوان کشوری با مناطق باد خیز فراوان، در صورت استفاده از منابع این انرژی، می‌تواند بخش عظیمی از انرژی‌های مورد نیاز خود را تامین کند.

برای احداث نیروگاه بادی نکات مهمی وجود دارند که باید مدنظر قرار گرفته شوند. مهم‌ترین نکته تجزیه و تحلیل اقتصادی احداث نیروگاه بادی می‌باشد. در این مرحله هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سالیانه نیروگاه بررسی شده و از طرفی دیگر درآمد حاصل از نیروگاه که شامل فروش برق است پیش‌بینی می‌شود درصورت صرفه اقتصادی می‌توان نیروگاه بادی را احداث نمود. نکته مهم دیگر مربوط به آرایش مزرعه می‌باشد که نحوه چیدمان و تعداد توربین‌ها برای تولید حدکثر انرژی به ازای حداقل هزینه برای اتصال بین توربین‌ها باید درنظرگرفته شود. نکته مهم بعدی اثرات زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های بادی هم در مرحله احداث و هم در مرحله بهره‌برداری می‌باشد که باید آن‌ها را به حداقل رساند. این عوامل شامل اثرات زیستی‌محیطی تولید الکتریسیته، اثرات صدای توربین‌های بادی بر آزردگی صوتی و اثرات نیروگاه روی دمای هوا می‌باشد.

امید است با همکاری جوامع نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در تامین انرژی روز به روز افزایش یافته و محیط‌زیست، سالم و پاک برای نسل‌های آینده باقی بماند.

منابع

Azarpour, A., Suhaimi, S., Zahedi, G., & Bahadori, A. (2013). *A review on the drawbacks of renewable energy as a promising energy source of the future*. Arabian Journal for Science and Engineering, 38, 317-328. https://doi.org/10.1007/s13369-012-0436-6

Amani, A., & Hosseini Shamachi, A. (2009). *The study of wind energy in the stations of the catchment area of the South Aras River*. Journal of Geographical Space, 10, 1-26. (In Persian).

Bokde, N.; Feijóo, A.; Villanueva, D., & Kulat, K. (2019). *A review on hybrid empirical mode decomposition models for wind speed and wind power prediction*. Energies 2019, 12, 254.

Motahary, S. A., Ahmadian, M., Abedi, Z., & Ghafarzadeh, H. R. G. (2014). *Economic evaluation of wind power development in Iran considering the effect of energy price liberalization policy*. Iranian Energy Economics, 3(10), 179-200. (In Persian).

Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Ghorbani, N., & Breyer, C. (2018). *Analysis of 100% renewable energy for Iran in 2030: integrating solar PV, wind energy and storage*. International Journal of Environmental Science and Technology, 15(1), 17-36. https://doi.org/10.1007/s13762-017-1373-4

Bošnjaković, M., Katinić, M., Santa, R., & Marić, D. (2022). *Wind turbine technology trends*. Applied Sciences, 12(17), 8653. https://doi.org/10.3390/app12178653

IRENA. *Future of Wind Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects.* Available online. https://www.irena.org (accessed on 20 July 2022).

Samai, M., & Sadeghi, H. (2000). *Performance Study and Improvement of Classic Wind Turbines*. Fourth National Conference on Village and Energy, Chah Bahar. (In Persian).

Shamsabadi, A. (2000). *Investigating the possibility of using wind energy in the climatic conditions of different parts of Iran.* Fourth National Conference on Villages and Energy, Chah Bahar. (In Persian).

Hosseini, S.M., & Forouzbakhsh, F. (2004). *Economic Analysis of Wind Power Plant Construction.* International Electricity Conference. (In Persian).

Fokaides, P. A., Miltiadous, I. C., Neophytou, M. K. A., & Spyridou, L. P. (2014). *Promotion of wind energy in isolated energy systems: the case of the Orites wind farm*. Clean Technologies and Environmental Policy, *16*(3), 477-488. https://doi.org/10.1007/s10098-013-0642-2

Jensen, N. O. (1983). *A note on wind generator interaction*. Risø National Laboratory.[Wakes].

Blair, N., Dobos, A. P., Freeman, J., Neises, T., Wagner, M., Ferguson, T., ... & Janzou, S. (2014). *System advisor model, sam 2014.1. 14: General description (No. NREL/TP--6A20-61019)*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Mosetti, G. P. C. D. B., Poloni, C., & Diviacco, B. (1994). *Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, *51*(1), 105-116. https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90080-9

Grady, S. A., Hussaini, M. Y., & Abdullah, M. M. (2005). Placement of wind turbines using genetic algorithms. *Renewable energy*, *30*(2), 259-270. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.007

Marmidis, G., Lazarou, S., & Pyrgioti, E. (2008). *Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation.* Renewable energy, 33(7), 1455-1460. https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.004

Wan, C., Wang, J., Yang, G., Gu, H., & Zhang, X. (2012). *Wind farm micro-siting by Gaussian particle swarm optimization with local search strategy.* Renewable Energy, 48, 276-286. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.052

Ekonomou, L., Lazarou, S., Chatzarakis, G. E., & Vita, V. (2012). *Estimation of wind turbines optimal number and produced power in a wind farm using an artificial neural network model*. Simulation Modelling Practice and Theory, *21*(1), 21-25. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.09.009

Aghajani, H., M. Fattahi Moghaddam, H. Akbari,M. Tattahi. (2015). *Site Selection of Wind Turbines Based on Space Environmental Assessment (Case Study: Khorasan Razavi), 2, Vol. 18, No. 1, pp. 85-99*. (In Persian).

Beheshtiya, M.A., & Gazaneh, O. (2016). *Determining the optimal arrangement of wind turbines with the aim of maximizing the output power of the wind farm and minimizing the cost of connecting the turbines*. Scientific Research Journal of Energy Engineering and Management. (In Persian).

Alam, C. N., & Sood, V. K. (2020, November). *Review of Protection Strategies for Wind Turbines against Lightning*. In 2020 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC) (pp. 1-8). IEEE. https://doi.org/10.1109/EPEC48502.2020.9320037

Shirmohamadi, S., & Shariatinasab, R. (2025). *Wind farm Collector Cable Network Protection against Direct Lightning Strokes.* Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 91-108. https://doi.org/10.22075/jme.2024.30565.2447

Joseph, V. S., Lucille, L., & Bruce, H. (2000). *Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generation Chain*. *IAEA Bulletin*, *42*(2).

Standardization, I. O. F. (2006). *Environmental management: life cycle assessment: principles and framework*. *Vol. ISO*, *14040*.

Bidstrup, M. (2015). *Life cycle thinking in impact assessment—Current practice and LCA gains.* Environmental Impact Assessment Review, 54, 72-79. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.05.003

Zare Thani, H., & Nisari, P. (2016). *Wind energy and its life cycle evaluation.* In *10th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran. Mashhad, Iran*.(In Persian).

Teffera, B., Assefa, B., Björklund, A., & Assefa, G. (2021). *Life cycle assessment of wind farms in Ethiopia*. The International Journal of Life Cycle Assessment, *26*(1), 76-96. https://doi.org/10.1007/s11367-020-01834-5

Li, H., Jiang, H. D., Dong, K. Y., Wei, Y. M., & Liao, H. (2020). *A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China*. Journal of Cleaner Production, *248*, 119192. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119192

Moore, J. (2021). *A comparison of the environmental effects of renewable and non-renewable energies.* https://scholarworks.uark.edu/csesuht/28/

Alsaleh, A., & Sattler, M. (2019). *Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2*1*(4), 887-903. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01678-0

Nowroozipour, M., Tabatabaei Koloor, R., & Motevali, A. (2023). *Environmental impact assessment of electricity generation in wind power plants (case study: Kahak Qazvin and Aqkand Miyaneh).* Journal of Agricultural Machinery, *13*(4), 405-426. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jam.2022.76180.1102

Doolan, C. J., Moreau, D. J., & Brooks, L. A. (2012). *WIND TURBINE NOISE MECHANISMS AND SOME CONCEPTS FOR ITS CONTROL*. Acoustics Australia, 40(1).

Nobbs, B., Doolan, C. J., & Moreau, D. J. (2012). *Characterisation of noise in homes affected by wind turbine noise*. In Proceedings of acoustics.

Erickson, V. (2013). Director, Ministry of the Environment. Environmental Review Tribunal case nos. 2013, 10-121/10-122.

Nissenbaum, M. A., Aramini, J. J., & Hanning, C. D. (2012). *Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health.* Noise and Health, 14(60), 237-243. https://doi.org/10.4103/1463-1741.102961

Jeffery, R. D., Krogh, C., & Horner, B. (2013). *Adverse health effects of industrial wind turbines*. Canadian Family Physician, 59(5), 473-475.

Pierpont, N. (2009). *Wind turbine syndrome: A report on a natural experiment* (p. 270). Santa Fe, NM: K-Selected Books.

Janssen, S. A., Vos, H., Eisses, A. R., & Pedersen, E. (2011). *A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources*. The Journal of the Acoustical Society of America, 130(6), 3746-3753. https://doi.org/10.1121/1.3653984

Abbasi, M., Monazzam, M. R., Akbarzadeh, A., Zakerian, S. A., & Ebrahimi, M. H. (2015). *Impact of wind turbine sound on general health, sleep disturbance and annoyance of workers: a pilot-study in Manjil wind farm, Iran*. Journal of Environmental Health Science and Engineering, *13*(1), 71. https://doi.org/10.1186/s40201-015-0225-8

ISO 9612: (en), *Acoustics - Determination of occupational noise exposure* - Engineering method 2009.

ISO/TS 15666, *Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acousticsurveys.* International Organization for Standardization, 2003.

Baidya Roy, S., Pacala, S. W., & Walko, R. L. (2004). *Can large wind farms affect local meteorology?*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D19). https://doi.org/10.1029/2004JD004763

Adams, A. S., & Keith, D. W. (2007, December). *Wind energy and climate: Modeling the atmospheric impacts of wind energy turbines*. In *Agu fall meeting abstracts* (Vol. 2007, pp. B44B-08).

Kirk-Davidoff, D. B., & Keith, D. W. (2008*). On the climate impact of surface roughness anomalies.* Journal of the Atmospheric Sciences, *65*(7), 2215-2234.

Baidya Roy, S., & Traiteur, J. J. (2010). *Impacts of wind farms on surface air temperatures.* Proceedings of the National Academy of Sciences, 1*07*(42), 17899-17904. https://doi.org/10.1073/pnas.1000493107