

Reliability analysis of turbines used in the wind power plants

Ali Nadaf-fardi, *MSc*, Abdoreza Rastitalab, *Assistant Professor*

Department of mechanic engineering, Dariun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran
rastitalaba@gmail.com

Received: 10 July 2025

Revised: 29 August 2025

Accepted: 12 September 2025

Abstract:

Given that fossil fuels cause environmental pollution, efforts have been made in different countries of the world to use renewable power plants instead of power plants that use fossil fuels to generate electricity. One of the important types of these power plants is wind power plants, which have been developed in different countries of the world. In these power plants, by installing wind turbines, the kinetic energy of the wind is used, the wind turbines rotate and electricity is generated. Therefore, wind turbines are one of the important components in wind power plants. On the other hand, reliability has become important in various systems. The reliability of a system means how well that system performs its work. The performance (availability and efficiency) and reliability of wind turbines can make the difference between the success and failure of wind farm projects, and these factors are vital for reducing energy costs. Given the importance of studying reliability in various systems, this paper studies the reliability of wind turbines used in wind power plants. There are numerous uncertainties in the design of such devices and their components. To ensure the safety of the turbines, these uncertainties must be taken into account. This research shows how this can be done in the design of wind turbine rotor blades in the context of bending failure caused by severe loading. First, the basic characteristics of such turbines in general and their blades are described. Then, a probabilistic model of wind speed fluctuations, which is the main source of loading uncertainty, is presented. After that, a blade reliability analysis is presented that considers the uncertainties associated with wind speed, blade resistance, and the model used to calculate the bending moments in the blades.

Index Terms — Reliability, wind turbine, wind power plant, wind speed, failure.

Corresponding Author: Abdoreza Rastitalab

Corresponding Author Address: Department of mechanic Engineering- Dariun Branch -Islamic Azad University- Dariun, Iran

تحلیل پایایی توربین‌های مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی

علی نداف فرد، دانشجوی کارشناسی ارشد، عبدالرضا راستی طلب، استادیار

دانشکده مهندسی، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران
rastitalaba@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

چکیده: به دلیل مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی که مهمترین آن مشکلات زیست محیطی این سوخت‌ها می‌باشد روند استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله نیروگاه‌های بادی به منظور تولید برق در کشورهای مختلف دنیا سرعت گرفته است. در این نیروگاه‌ها با نصب توربین‌های بادی، از انرژی جنبشی باد استفاده شده، توربین‌های بادی به چرخش در می‌آیند و برق تولید می‌گردد. بنابراین، توربین‌های بادی یکی از اجزای مهم در نیروگاه‌های بادی می‌باشد. از طرف دیگر امروزه قابلیت اطمینان که معادل فارسی آن پایایی است در سیستم‌های مختلف اهمیت پیدا کرده است. پایایی یک سیستم به این معنا است که آن سیستم تا چه اندازه کار خود را بطور صحیح انجام می‌دهد. عملکرد (دسترس‌پذیری و بازده) و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی می‌تواند تفاوت بین موفقیت و شکست پروژه‌های مزرعه بادی را رقم بزند و این عوامل برای کاهش هزینه انرژی حیاتی هستند. با توجه به اهمیت مطالعه پایایی در سیستم‌های مختلف، در این مقاله پایایی توربین‌های بادی به کار رفته در نیروگاه‌های بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در طراحی چنین دستگاه‌ها و اجزای آن‌ها، عدم قطعیت‌های متعددی وجود دارد. برای اطمینان از ایمنی توربین‌ها، باید این عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شوند. این تحقیق نشان می‌دهد که چگونه می‌توان این کار را در طراحی پره‌های روتور توربین‌های بادی، در زمینه شکست خمشی ناشی از بارگذاری‌های شدید، انجام داد. در ابتدا، ویژگی‌های پایه‌ای چنین توربین‌ها به طور کلی و پره‌های آن‌ها شرح داده می‌شود. سپس یک مدل احتمالاتی از نوسانات سرعت باد، که منبع اصلی عدم قطعیت بارگذاری است، ارائه می‌شود. پس از آن، تحلیل قابلیت اطمینان پره‌ها که عدم قطعیت‌های مرتبط با سرعت باد، مقاومت پره و مدل مورد استفاده برای محاسبه گشتاورهای خمشی در پره‌ها را در نظر می‌گیرد، ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: پایایی، توربین بادی، نیروگاه بادی، سرعت باد، خرابی

نام نویسنده‌ی مسئول: عبدالرضا راستی طلب

نشانی نویسنده‌ی مسئول: داریون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد داریون - دانشکده مهندسی مکانیک

۱- مقدمه

نصب توربین‌های بادی در حال رشد چشمگیری است. در سال ۲۰۱۶ بیش از ۵۴ گیگاوات ظرفیت بادی در سراسر جهان نصب شده است. همه توربین‌های جدید و همچنین توربین‌های موجود (حدود ۴۸۶ گیگاوات در مجموع) باید به دقت بهره‌برداری و نگهداری شوند. طبق مطالعات اخیر، عملیات و نگهداری بین ۲۵٪ تا تقریباً ۴۰٪ از هزینه سطح‌بندی شده انرژی را تشکیل می‌دهد. بازده انرژی نیز به شدت تحت تأثیر موفقیت استراتژی‌های عملیات و نگهداری قرار دارد. بنابراین، بهینه‌سازی عملیات و نگهداری اهمیت بالایی برای کاهش بیشتر هزینه سطح‌بندی شده انرژی دارد. پیش از شروع بهینه‌سازی، باید وضعیت فعلی شناخته شده و اقدامات بعدی اولویت‌بندی شوند. در سال‌های اخیر، چندین مقاله برای جمع‌آوری داده‌های عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی خشکی و دریایی آغاز شده و نتایج آن‌ها در مجلات و کنفرانس‌های مختلف منتشر شده است. در [1] آنالیز پایایی توربین‌های بادی صورت گرفته است. در مقابل پس‌زمینه افزایش پیوسته تولید برق بادی در سرتاسر جهان، سازندگان توربین‌های بادی به توسعه طیف وسیعی از پیکربندی‌ها با ترکیب‌های مختلف کنترل گام، سرعت روتور، گیربکس، ژنراتور و مبدل ادامه می‌دهند. این مقاله طرح‌های اصلی را با تمرکز بر قابلیت اطمینان آن‌ها با گردآوری و مقایسه داده‌ها از مجموعه‌ای از مطالعات عمده در ادبیات را می‌کند. اینها به طور خاص سازگار نیستند، اما ترسیم نرخ خرابی در برابر ساعت‌های از دست رفته در هر خرابی نشان می‌دهد که مشکلات تیغه‌ها و گیربکس‌ها منجر به بیشترین زمان خرابی می‌شوند. توربین‌های بادی جدید و بزرگ‌تر معمولاً بیشتر از توربین‌های کوچک‌تر خراب می‌شوند، بنابراین نظارت بر وضعیت به طور فزاینده‌ای ضروری می‌شود تا سطح قابلیت اطمینان بهبود یابد. در [2] مطالعه قابلیت اطمینان توربین‌های بادی صورت گرفته است. این مطالعات با هدف مینیمم کردن هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از توربین‌های بادی و همچنین هزینه‌های مربوط به عملیات تعمیرات و نگهداری آن‌ها انجام شده است.

مقاله [3] مروری بر مطالعات قابلیت اطمینان توربین بادی ارائه می‌کند. سیزده مطالعه قابلیت اطمینان در ادبیات علمی شناسایی شد که فقدان داده‌های قابلیت اطمینان عمومی را برجسته می‌کند. در این مقاله تفاوت‌های بین مطالعات ارائه شده، و تلاش زیادی برای متحد کردن مطالعات مختلف برای به دست آوردن نتایج قابل مقایسه انجام می‌شود. برای این منظور، تلاش شده است تا یک طبقه‌بندی توربین بادی توسعه یابد که در مطالعات مختلف استفاده شود. این دسته‌بندی توسط سیزده مجموعه تشکیل شده، رایج بوده، و نرخ‌های خرابی و زمان‌های خرابی هر مطالعه عادی تعیین شده است. نتایج تفاوت‌هایی را بین مجموعه‌های کم‌اعتماد، طبقه‌بندی شده به عنوان بحرانی، و قابل‌اعتمادترین آن‌ها ایجاد می‌کند. تفاوت‌های کوچکی بین مکان‌های خشکی و فراساحلی و بین مطالعات روی مزارع بادی اروپا و سایر موارد در ایالات متحده و چین ظاهر می‌شود. تأثیر بر کل خرابی‌ها و زمان خرابی جدیدترین مطالعات در مقایسه با مطالعات قدیمی ارزیابی شده است. این نتایج به روشن کردن جهت درست برای طراحی و توسعه پایش شرایط و در نتیجه بهبود قابلیت اطمینان و در دسترس بودن توربین‌های بادی کمک می‌کند.

قابلیت اطمینان برای طراحی، بهره‌برداری، نگهداری و ارزیابی عملکرد و بهبود توربین‌های بادی حیاتی است. مقاله [4] به طور سیستماتیک داده‌های قابلیت اطمینان در دسترس عموم را برای توربین‌های بادی خشکی و فراساحلی بررسی می‌کند و اثرات قابلیت اطمینان بر هزینه انرژی را بررسی می‌کند. نرخ‌های خرابی توربین‌های بادی و زمان‌های خرابی، به‌صورت زیر مجموعه، از ۱۸ پایگاه داده در دسترس عموم شامل بیش از ۱۸۰۰۰ توربین بادی که مربوط به بیش از ۹۰۰۰۰ سال توربین است، جمع‌آوری شده‌اند. داده‌ها بر اساس انواع داده‌های جمع‌آوری شده (نرخ شکست و نرخ توقف) و بر اساس جمعیت خشکی و فراساحلی طبقه‌بندی می‌شوند. یک تحلیل جامع برای بررسی تغییرات داده‌های قابلیت اطمینان زیرمجموعه توربین‌های بادی، شناسایی زیرمجموعه‌های مهم، مقایسه قابلیت اطمینان توربین‌های بادی خشکی و فراساحلی، و درک منابع احتمالی عدم قطعیت انجام می‌شود. تغییرات زیادی در نرخ خرابی و زمان‌های خرابی مشاهده می‌شود، و انحراف در توزیع نرخ خرابی نشان می‌دهد که پایگاه‌های اطلاعاتی بزرگ با نرخ خرابی پایین، علی‌رغم جمعیت‌های متنوعشان، نسبت به بررسی‌های هدفمندتر که به راحتی توسط خرابی‌های نوع توربین‌های بادی منحرف می‌شوند، نامطمئن‌تر نیستند. مدلی برای ارزیابی هزینه تراز انرژی به عنوان تابعی از نرخ خرابی توربین‌های بادی و زمان خرابی ارائه شده است. یک مطالعه عددی یک رابطه قوی و غیرخطی بین

قابلیت اطمینان توربین‌های بادی و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و همچنین تولید انرژی سالانه را اثبات می‌کند. همراه با مدل تجزیه و تحلیل هزینه، یافته‌ها می‌توانند به اپراتورهای توربین‌های بادی کمک کنند تا درجه بهینه بهبود قابلیت اطمینان را برای به حداقل رساندن هزینه همسطح انرژی شناسایی کنند.

توربین‌های بادی به تعداد فزاینده‌ای در اروپا، ایالات متحده آمریکا و جاهای دیگر ساخته شده‌اند. در اروپا، دانمارک نقش مهمی در توسعه این فناوری ایفا کرده و تعداد زیادی توربین نصب کرده است. مقاله [5] به تأثیر آب و هوا بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی مدرن و به ویژه تأثیر سرعت باد می‌پردازد. هدف اصلی این کار استخراج اطلاعات از داده‌های قابلیت اطمینان موجود برای نتیجه‌گیری در مورد اینکه چگونه سرعت باد بر قابلیت اطمینان توربین تأثیر می‌گذارد و کدام زیرمجموعه‌ها در توربین بیشترین تأثیر را دارد، است. هدف این است که اطلاعات در اختیار سازندگان و اپراتورهای توربین قرار گیرد تا قابلیت اطمینان طرح‌های جدید توربین‌های بادی بهبود یابد، به‌ویژه اگر قرار است در خارج از ساحل نصب شوند، جایی که آب و هوا نامساعدتر است. داده‌ها از Windstats برای توربین‌های بادی گذشته، نگهداری شده دانمارکی و داده‌های آنلاین جمع‌آوری شده برای آب و هوای دانمارک جمع‌آوری می‌شود. این داده‌ها برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان توربین‌های بادی و زیرمجموعه‌های آن‌ها در شرایط آب و هوایی مختلف از سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴ استفاده می‌شوند. این مقاله روش‌های عملی استخراج اطلاعات از داده‌های قابلیت اطمینان توربین بادی را توصیف می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه طراحی توربین، پیکربندی توربین، زمان و آب و هوا می‌تواند بر نتایج استخراج‌شده تأثیر بگذارد.

مطالعه [6] با استفاده از پایگاه داده برنامه تست آلمانی "باد" تلاش می‌کند تا دانش دقیق‌تری از خرابی توربین‌های بادی بدست آورد. اهداف خاص نشان دادن قابلیت اطمینان برخی از اجزای اصلی و تجزیه و تحلیل اینکه چگونه طراحی آن‌ها در طول زمان پیشرفت کرده است، شکست‌های اصلی چیست و کدام فناوری‌ها کارایی خود را ثابت کرده‌اند. در داخل برنامه، گزارش‌های مربوط به عملیات و نگهداری با توجه به نوع توربین‌های بادی، اندازه و فناوری‌های مورد استفاده تجزیه و تحلیل می‌شوند. این مقاله مقایسه‌ای از قابلیت اطمینان قطعات در طول زمان، با توجه به فناوری آن‌ها را ارائه می‌دهد. نتایج تفاوت قابل توجهی را در قابلیت اطمینان برای اجزای فرعی خاص بسته به اندازه توربین‌های بادی و به ویژه در نوع کنترل توان نشان می‌دهد. به عنوان مثال، ژنراتورهای القایی نیمی از میزان خرابی سالانه را در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون نشان می‌دهند. این مطالعه همچنین شامل خرابی سایر مؤلفه‌هایی است که به دلیل استفاده از مؤلفه‌های مورد تجزیه و تحلیل تحت تأثیر قرار می‌گیرند یا اضافه می‌شوند. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نرخ شکست توربین‌های بادی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. بیشتر داده‌ها یک دوره کوتاه «شکست‌های اولیه» و بعداً یک دوره طولانی «شکست‌های تصادفی» را نشان می‌دهند. با این حال، این مورد برای کلاس مگاوات نیست: با ورود فناوری به بازار، توربین‌های بادی رفتار خرابی اولیه طولانی‌تری را نشان می‌دهند که هنوز پایدار نشده است. علاوه بر این، توربین‌های بزرگ، که در پایگاه داده تحلیل شده گنجانده شده‌اند، نرخ خرابی سالانه قطعات را در هر توربین بادی نشان می‌دهند. این ممکن است به دلیل فناوری نابالغ توربین‌های بادی موجود در پایگاه داده باشد.

عملکرد (در دسترس بودن و بازدهی) و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی می‌تواند تفاوت بین موفقیت و شکست پروژه‌های مزرعه بادی را ایجاد کند و این عوامل برای کاهش هزینه انرژی حیاتی هستند. در سال‌های گذشته، مقالات متعددی برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در داخل و خارج از ساحل و یافته‌های منتشر شده در مجلات و کنفرانس‌های مختلف آغاز شد. اگرچه دامنه مقالات مختلف مشابه است، هر مقاله از رویکرد متفاوتی پیروی می‌کند و بنابراین مقایسه نتایج دشوار است. مقاله [7] با این موضوع مواجه است، نتایج حاصل از مقالات مختلف را جمع‌آوری و نتایج را هماهنگ می‌کند. شرح و ارزیابی کوتاهی از هر منبع داده در نظر گرفته شده ارائه شده است. برای فعال کردن این مقایسه، ویژگی‌های قابلیت اطمینان موجود بر اساس سیستم تعیین مرجع برای نیروگاه‌ها به ساختار سیستم نگاشت می‌شوند. بررسی تنوع گسترده‌ای را در معیارهای عملکرد و قابلیت اطمینان مقالات فردی نشان می‌دهد. به خصوص مقایسه بر روی توربین‌های بادی خشکی تفاوت‌های قابل توجهی را بین نتایج نشان می‌دهد. تنها تعداد کمی از انتشارات در مورد توربین‌های بادی فراساحلی موجود است و نتایج نشان‌دهنده افزایش عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی دریایی از زمان احداث و پایش

اولین مزارع بادی فراساحلی است. در سال‌های اخیر، چندین مقاله برای جمع‌آوری داده‌های عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی خشکی و دریایی آغاز شده و نتایج آن‌ها در مجلات و کنفرانس‌های مختلف منتشر شده است. اگرچه اهداف این مقالات مشابه است، هر کدام رویکرد متفاوتی دارند و به همین دلیل مقایسه نتایج دشوار است. این مقاله به این موضوع می‌پردازد، نتایج مقالات مختلف را جمع‌آوری و هماهنگ می‌کند. یک مرور کلی بر همه مقالات مورد بررسی همراه با شرح کوتاه و ارزیابی منابع داده ارائه شده است. این مقاله سعی دارد خواننده را به بهترین منبع اطلاعاتی برای نیازهای خاص خود هدایت کند و تمام اطلاعات را به گونه‌ای آماده نماید که به راحتی قابل دسترسی باشد، اهمیت مقالات مورد بررسی را تحلیل کند و روندهای بنیادی را جستجو نماید. برای این منظور، مقاله با ارائه تعاریف مهم آغاز می‌شود. سپس رویکردهای مختلف جمع‌آوری و تحلیل داده‌های تعمیرات نگهداری را معرفی می‌کند و سپس مرور مقالات مورد بررسی همراه با توضیحات دقیق منابع ارائه می‌شود. نتایج عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در ادامه ارائه شده‌اند. در نهایت، نتایج را بحث کرده و چشم‌اندازی از توسعه‌های آینده ارائه می‌دهد.

توربین‌های جریان جزر و مد برای تبدیل انرژی جنبشی جریان‌های جزر و مد به برق استفاده می‌شوند. در طراحی چنین دستگاه‌ها و اجزای آن‌ها، عدم قطعیت‌های متعددی وجود دارد. برای اطمینان از ایمنی توربین‌ها، باید این عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شوند. مقاله [8] نشان می‌دهد که چگونه می‌توان این کار را در طراحی پره‌های روتور توربین‌های جریان جزر و مد با محور افقی، در زمینه شکست خمشی ناشی از بارگذاری‌های شدید، انجام داد. در ابتدا، ویژگی‌های پایه‌ای چنین توربین‌ها به طور کلی و پره‌های آن‌ها به طور خاص به طور خلاصه شرح داده می‌شود. سپس یک مدل احتمالاتی از نوسانات سرعت جریان جزر و مد، که منبع اصلی عدم قطعیت بارگذاری است، ارائه می‌شود. پس از آن، تحلیل قابلیت اطمینان پره‌ها که عدم قطعیت‌های مرتبط با سرعت جریان جزر و مد، مقاومت پره و مدل مورد استفاده برای محاسبه گشتاورهای خمشی در پره‌ها را در نظر می‌گیرد، شرح داده می‌شود. در نهایت، مقاله نشان می‌دهد که چگونه نتایج تحلیل قابلیت اطمینان می‌تواند برای تعیین مقادیر ضرایب جزئی در طراحی پره‌ها به کار رود.

مطالعه [9] به طور سیستماتیک برخی از الزامات طراحی و روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان برای گیربکس‌های توربین بادی را بررسی می‌کند. سپس، مطالعات قبلی در مورد روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت بار باد، از جمله پردازش داده‌های اندازه‌گیری باد و خلاصه سه طبقه‌بندی مختلف از مدل‌های پیش‌بینی سرعت باد تصادفی را خلاصه می‌کند. در نهایت، مطالعات تحلیل قابلیت اطمینان موجود در دو بخش اصلی گیربکس شرح داده شده و خلاصه می‌شوند. در مقاله [10] چگونگی پیش‌بینی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله مروری فنی بر روش‌های ارزیابی هزینه انرژی تولیدی توربین‌های بادی صورت گرفته و به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. مطالعه [11] یک چارچوب نوآورانه با هدف افزایش قابلیت اطمینان، طول عمر و مقرون به صرفه بودن توربین‌های بادی شناور معرفی می‌کند. این رویکرد با ادغام یکپارچه روش‌های سطح پاسخ گذرا و حالت پایدار، ابعاد داده‌های شبیه‌سازی پرهزینه و با دقت بالا برای توربین‌های بادی شناور را کاهش می‌دهد. این روش به طور مؤثر از نمونه‌های تاریخیچه پاسخ تصادفی در حوزه زمان استفاده می‌کند و به دو جنبه حیاتی در تحلیل قابلیت اطمینان، از جمله ویژگی‌های آماری مربوط به حداکثر بارهای مرتبط با طراحی مقاومت استاتیک و ویژگی‌های توزیع دامنه‌های ارتعاش مربوط به طراحی آسیب خستگی، می‌پردازد. داده‌های پردازش شده برای ساخت یک متامدل اول رو به جلو استفاده می‌شود که در یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ادغام می‌شود. این الگوریتم ابرپارامترهای بهینه را بر اساس شرایط محیطی تصادفی تعیین می‌کند. متعاقباً، یک متامدل دوم معکوس ایجاد می‌شود که در رابطه با متامدل اول کار می‌کند و یک ساختار دوگانه برای تحلیل قابلیت اطمینان تشکیل می‌دهد. شبیه‌سازی‌های گسترده مونت کارلو و تحلیل‌های چگالی احتمال، اثربخشی استراتژی فرکانس کنترل‌کننده انعطاف‌پذیر تطبیقی را که با استفاده از چارچوب پیشنهادی به دست آمده است، در کاهش خطرات برخورد نوک پره به برج ناشی از ارتعاش و آسیب ارتعاشی طولانی مدت، به ویژه در سرعت‌های باد کم تا متوسط، نشان می‌دهد. این امر به طور قابل توجهی پایداری و ایمنی توربین را بهبود می‌بخشد و عملکرد کلی را افزایش می‌دهد. روش پیشنهادی، بینش‌های ارزشمندی در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از توربین‌های بادی شناور ارائه می‌دهد.

با توجه به اینکه تاکنون تاثیر سرعت باد بر شاخص‌های پایایی توربین بادی بررسی نشده است باید به دنبال مدلی بود تا بتوان تاثیر تغییرات سرعت وزش باد بر پایایی توربین بادی را بررسی نمود. بر همین اساس در این مقاله این مدل ارائه شده است. با توجه به شکاف تحقیقاتی، نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

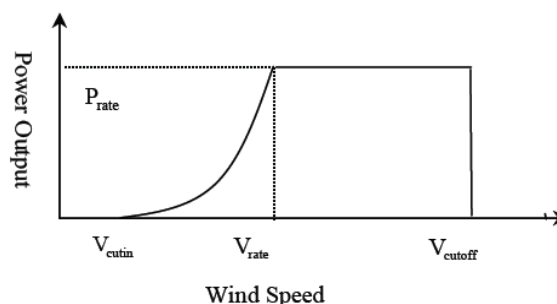
- مدل پایایی توربین بادی به دست آورده شده است.
 - تاثیر سرعت باد بر پایایی توربین بادی بررسی شده است.
- با توجه به اهدافی که این مقاله در زمینه تحلیل پایایی توربین‌های بادی دنبال می‌کند سازماندهی آن به صورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه‌های بادی و در بخش سوم آنالیز پایایی این نیروگاه‌ها بیان می‌شود. بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی را ارائه داده و نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم بیان می‌گردد.

۲- نیروگاه‌های بادی

توان مربوط به یک توده هوا (باد) با سرعت وزش v ، عبوری از سطح مقطع A و با چگالی ρ (تابعی از ارتفاع و دمای هوا) به صورت رابطه زیر خواهد بود:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

طبق قانون Betz تنها ۵۹ درصد از این توان از توربین بادی قابل استحصال است. توان خروجی یک واحد بادی به سرعت وزش باد وابسته بوده و این وابستگی در قالب یک مشخصه که به منحنی توربین معروف است بیان می‌شود. با توجه به این مشخصه می‌توان به ازای یک سرعت مشخص توان خروجی توربین باد را تعیین نمود. در این منحنی سه سرعت قابل تأمل وجود دارد: سرعت قطع پایین که به ازای سرعت‌های کمتر از این مقدار توان خروجی توربین صفر خواهد بود، سرعت نامی که به ازای این سرعت توان خروجی توربین بادی مقدار نامی را خواهد داشت و این توان نامی در محدوده سرعت‌های وزش باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا برقرار خواهد بود و سرعت قطع بالا که در سرعت‌های بالاتر از این سرعت که برای توربین بادی خطرناک بوده و ممکن است به آن آسیب برساند تولید برق متوقف شده و توان خروجی صفر خواهد بود. به ماکزیمم سرعتی که توان خروجی به ازای سرعت‌های بعد از آن صفر می‌شود، سرعت قطع بالا گفته می‌شود. یک نمونه منحنی توربین در شکل ۱ نشان داده شده است.

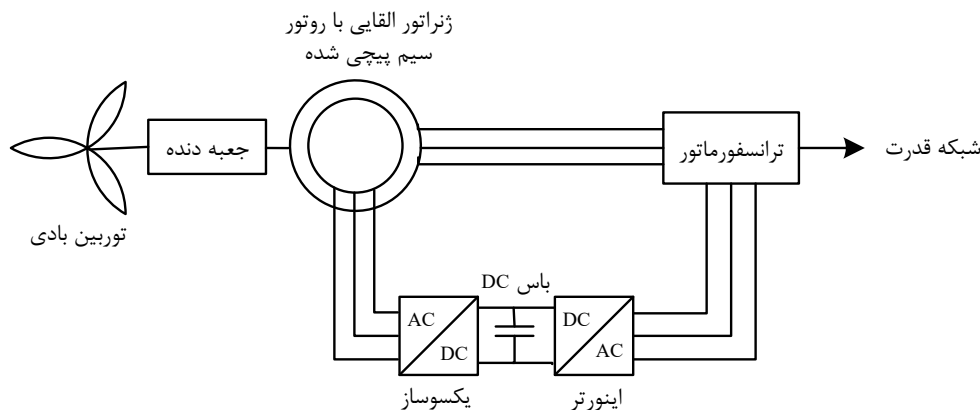


شکل (۱): منحنی توان توربین بادی

از بین تکنولوژی‌های تولید توان در نیروگاه‌های بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه شونده (شکل ۲) به دلیل داشتن کیفیت و بازده مناسب بسیار مورد توجه قرار گرفته و بیش از ۷۰ درصد از توربین‌های بادی نصب شده در سطح جهان بر اساس این تکنولوژی ساخته شده‌اند.

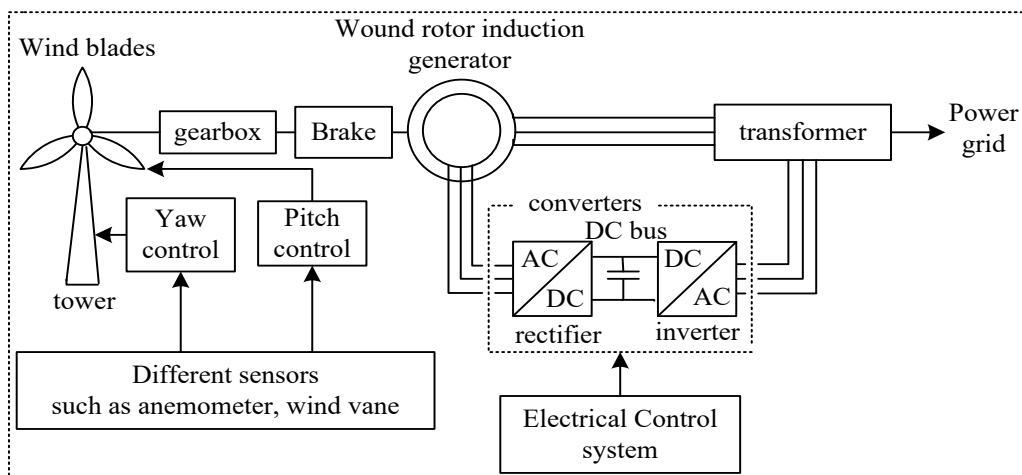
اجزای مهم تشکیل‌دهنده یک نیروگاه بادی که بر اساس تکنولوژی ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه شونده کار می‌کند در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است توربین توسط دکل نگه داشته شده و شامل پره‌ها می‌باشد که با وزش باد می‌چرخند. یک سیستم کنترلی موسوم به کنترل حرکت عرضی برای ثابت نگه داشتن سرعت ژنراتور در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی و دستیابی به توان خروجی ثابت استفاده می‌شود. این سیستم کنترلی به کمک یک موتور جهت پره‌ها را تغییر داده تا سطح مقطع موثر پره‌ها که با باد درگیر هستند را کم و زیاد نموده و توان ثابت بماند. ترمز به

منظور متوقف نمودن چرخش پره‌ها در سرعت‌های بالاتر از سرعت ماکزیمم (سرعت قطع بالا) به منظور جلوگیری از آسیب دیدن توربین استفاده می‌شود. سیستم حرکت دورانی به منظور ماکزیمم نمودن توان تولیدی توربین استفاده می‌شود. توسط سنسورهای مربوطه جهت وزش باد تعیین شده و موتورهای مربوطه کل محفظه را حول دکل چرخانده تا پره‌ها در معرض وزش موثر باد قرار بگیرند و توان حاصل ماکزیمم شود.



شکل (۲): اجزای تشکیل دهنده توربین بادی

دو نوع سنسور در توربین‌های بادی وجود دارد: یکی بادسنج که سرعت وزش باد را اندازه‌گیری می‌کند و دیگری بادنما که جهت وزش باد را تشخیص می‌دهد. جعبه دنده که روتور ژنراتور القایی را به محور چرخش وصل می‌کند دارای نسبت بالا در سرعت‌های کم و نسبت کمتر در سرعت‌های زیاد است. ژنراتور از نوع القایی با روتور سیم‌پیچی شده می‌باشد که استاتور آن مستقیماً و روتور توسط مبدل الکترونیک قدرت به شبکه وصل می‌شود. توان الکتریکی ژنراتور توسط کابل از بالای دکل به پایین در محل خطوط انتقال منتقل می‌شود.



شکل (۳): اجزای تشکیل دهنده واحدهای بادی مبتنی بر تکنولوژی ژنراتورهای دو سو تغذیه شده

۳- ارزیابی پایایی توربین‌های بادی

یکی از تجهیزاتی که در نیروگاه‌های بادی در معرض خرابی می‌باشد، توربین بادی می‌باشد. با توجه به تغییر در سرعت باد، استرس‌هایی که بر پره‌های توربین بادی وارد می‌شود تغییر کرده و لذا نرخ خرابی این توربین‌ها نیز تغییر می‌کند. رابطه بین احتمال خرابی توربین بادی بر حسب سرعت باد به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P_F = \text{Probability}(f(v) \leq 0) \quad (2)$$

در رابطه فوق P_F احتمال خرابی توربین بادی می‌باشد که برابر با احتمال این است که مقدار تابع $f(v)$ کوچکتر یا مساوی صفر باشد. به تابع f ، تابع محدودیت گفته می‌شود و تابعی از سرعت باد (v) می‌باشد. مقدار تابع محدودیت را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$f(v) = st - \frac{cm}{z} \quad (3)$$

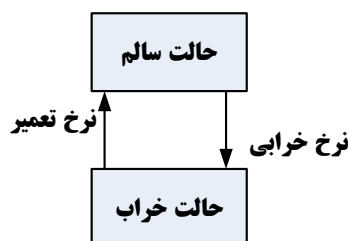
در رابطه فوق st بر حسب کیلو نیوتن بر مترمربع بوده و شاخصی است که بیان کننده میزان استحکام موادی است که در ساخت پره توربین مورد استفاده قرار گرفته است، m ممان خمشی مربوط به قسمت انتهایی توربین بوده و بر حسب کیلو نیوتن بیان می‌شود، z نیز سطح مقطع محورها بوده و c به منظور بیان نمودن عدم قطعیت مربوط به ممان خمشی قسمت انتهایی توربین مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار شاخص استحکام و سطح مقطع محور توربین ثابت بوده و توسط سازنده توربین بیان می‌شود. در این تحقیق مقدار شاخص استحکام 350 مگاپاسکال و سطح مقطع محور توربین‌ها 730 میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه ممان خمشی قسمت انتهایی توربین نیز رابطه زیر پیشنهاد شده است که این رابطه به صورت تجربی به دست آمده است:

$$m = 52.3v - 45.9 \quad (4)$$

به منظور بیان نمودن عدم قطعیت مربوط به ممان خمشی قسما انتهایی توربین از متغیر تصادفی c استفاده می‌شود. این متغیر تصادفی توزیع نرمال داشته و مقدار میانگین و کوواریانس آن به ترتیب 1 و 0.15 در نظر گرفته می‌شود. بنابراین این متغیر تصادفی دارای انحراف معیار 0.39 خواهد بود. بنابراین می‌توان مقدار احتمال خرابی توربین مورد مطالعه را در سرعت‌های مختلف به دست آورد و سپس با داشتن نرخ تعمیر توربین بادی، نرخ خرابی توربین بادی بر اساس روابط زیر به دست می‌آید. در مطالعات قابلیت اطمینان برای هر کدام از تجهیزات یک مدل مارکوف در نظر گرفته می‌شود. این مدل مارکوف حالت‌های مختلفی را که یک تجهیز می‌تواند داشته باشد نشان می‌دهد. در این تحقیق یک مدل مارکوف دو حالتی برای هر کدام از تجهیزات نیروگاه در نظر گرفته می‌شود. این مدل مارکوف شامل دو حالت سالم و خراب می‌باشد. نرخ انتقال از حالت سالم به خراب را نرخ خرابی می‌نامیم و با λ نشان می‌دهیم. همچنین نرخ انتقال از حالت خراب به حالت سالم را نرخ تعمیر می‌نامیم و با μ نمایش می‌دهیم. در شکل ۴ یک مدل مارکوف دو حالتی برای توربین نشان داده شده است. بر اساس مدل مارکوف دو حالتی که در شکل ۴ نشان داده شد، احتمال حالت سالم و احتمال حالت خراب بر اساس نرخ خرابی و نرخ تعمیر از روابط زیر به دست می‌آید:

$$P_P = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (5)$$

$$P_F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$



شکل (۴): مدل مارکوف دو حالتی

در روابط فوق P_F احتمال حالت خراب و P_P احتمال حالت سالم در مدل مارکوف می‌باشد. بنابراین می‌توان با داشتن احتمال حالت خراب و نرخ تعمیر یک تجهیز، مقدار نرخ خرابی آن تجهیز را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \Rightarrow \lambda = P_F(\lambda + \mu) \Rightarrow \lambda = \frac{P_F \mu}{1 - P_F} \quad (۶)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

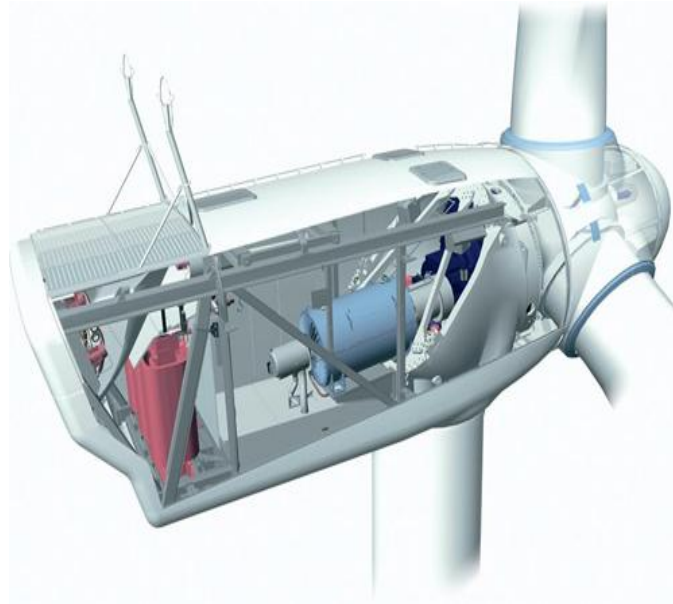
در این مقاله یک نیروگاه بادی مبتنی بر توربین بادی V90 با توان نامی ۳ مگاوات که توسط شرکت Vestas ساخته شده است مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه می‌باشد. در شکل ۵ ساختار این توربین بادی و در شکل ۶ منحنی توان توربین نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز مشخصات کلی این نیروگاه شامل توان نامی، سرعت قطع پایین، سرعت نامی، سرعت قطع بالا و ولتاژ خروجی ژنراتور آورده شده است. در این بخش از مقاله با توجه به مشخصات تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه و به کمک روابطی که در بخش قبل برای نرخ خرابی توربین بادی به دست آورده شد، تاثیر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی این تجهیز به عنوان یکی از تجهیزات مهم نیروگاه بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل ۷ تغییرات سرعت باد در منطقه منجیل که از پتانسیل خیلی خوبی در زمینه وزش باد برخوردار است در سال ۲۰۲۴ به صورت ساعت به ساعت نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است سرعت باد تغییرات زیادی در طول سال داشته و مقدار آن بین ۰ تا ۳۵ متر بر ثانیه در حال تغییر است. بنابراین در نظر گرفتن اثر تغییرات سرعت باد بر مطالعات قابلیت اطمینان در این منطقه که تغییرات سرعت باد زیاد است از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین با داشتن مشخصات توربین و پارامترهای آن و با تغییر دادن سرعت باد از ۰ تا ۳۵ متر بر ثانیه مقدار نرخ خرابی توربین بادی محاسبه می‌گردد. در شکل ۸ منحنی مربوط به تغییرات نرخ خرابی توربین بادی بر حسب سرعت باد نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است در سرعت‌های کمتر از سرعت قطع پایین، سرعت باد به اندازه کافی بالا نیست که بتواند توربین را بچرخاند. بنابراین در محدوده سرعت‌های باد بین ۰ تا سرعت قطع پایین که در اینجا ۳/۵ متر بر ثانیه است نرخ خرابی به دلیل عدم چرخش توربین ثابت بوده و مقدار آن کم است. پس از اینکه سرعت باد از سرعت قطع پایین بیشتر شد توربین بادی شروع به حرکت کرده و بر اساس سرعت باد، نرخ خرابی توربین از رابطه مربوطه که در فصل قبل استخراج شد به دست آورده می‌شود. در سرعت‌های کمتر از ۴/۵ متر بر ثانیه باز مقدار نرخ خرابی کم بوده و پس از این سرعت، نرخ خرابی توربین بادی شروع به افزایش می‌کند و بالا رفتن سرعت باد افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که نرخ خرابی توربین بادی از مقدار ۰/۱۲ در سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه به مقدار ۰/۳۷ در سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه می‌رسد.

جدول (۱): مشخصات نیروگاه‌های بادی Vestas90

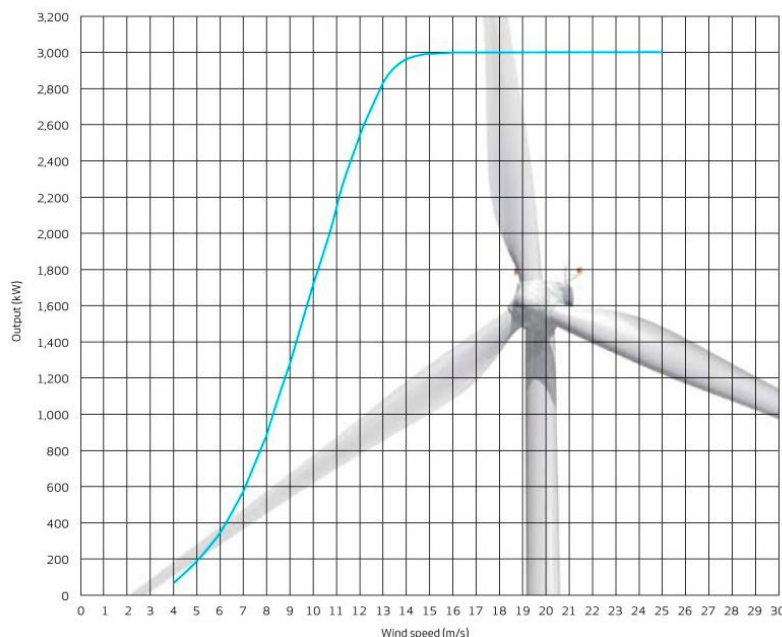
پارامتر	مقدار
توان نامی	۳ مگاوات
سرعت قطع پایین	۳/۵ متر بر ثانیه
سرعت قطع بالا	۲۵ متر بر ثانیه
سرعت نامی	۱۵ متر بر ثانیه
ولتاژ خروجی ژنراتور	۱۰۰۰ ولت
نوع ژنراتور	القایی دو سو تغذیه
فرکانس برق تولیدی	۵۰ هرتز

پس از اینکه سرعت توربین بادی به سرعت نامی رسید، با زیاد شدن سرعت باد دیگر سرعت توربین بادی افزایش نمی‌یابد و به کمک ابزارهای کنترلی در این سرعت ثابت نگه داشته می‌شود. بنابراین در محدوده سرعت‌های باد بین سرعت نامی و سرعت قطع بالا که سرعت توربین با سرعت نامی برابر است مقدار نرخ خرابی ثابت می‌باشد. در این توربین بادی، سرعت نامی ۱۵ متر بر ثانیه و سرعت قطع بالا ۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین در محدوده بین سرعت‌های باد ۱۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه مقدار نرخ خرابی توربین بادی ثابت بوده و برابر با ۰/۳۷ خرابی در سال خواهد بود. در صورتی که سرعت باد بیشتر از سرعت قطع بالا شود، به منظور جلوگیری از آسیب دیدن توربین بادی، چرخش توربین بادی متوقف می‌شود. بنابراین مقدار نرخ خرابی توربین

بادی به ازای سرعت‌های باد بیشتر سرعت قطع بالا کاهش می‌یابد. در توربین بادی مورد مطالعه، مقدار نرخ خرابی به ازای سرعت‌های باد بیشتر از ۲۵ متر بر ثانیه (سرعت قطع بالا) به دلیل عدم چرخش توربین برابر با مقدار ۰/۱۲ خرابی در سال به دست آمده است.



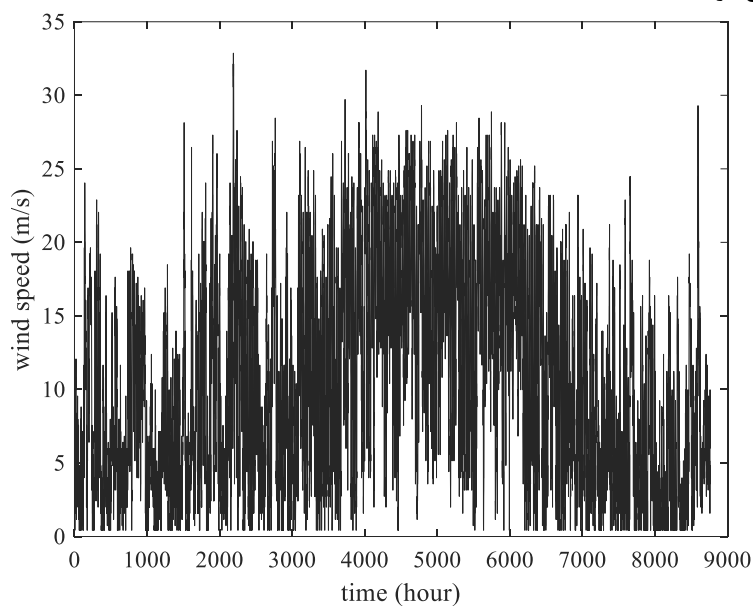
شکل (۵): توربین بادی Vestas90



شکل (۶): منحنی توان توربین بادی Vestas90

در این مرحله به مطالعه دسترس‌پذیری توربین بادی پرداخته می‌شود. به منظور تعیین دسترس‌پذیری یک تجهیز باید نرخ تعمیر آن بر مجموع نرخ خرابی و تعمیر تقسیم شود. بر همین اساس به نرخ تعمیر تجهیزات نیاز است. در جدول ۲ متوسط زمان تعمیر توربین بادی آورده شده است. با توجه به اطلاعات این جدول می‌توان نرخ تعمیر تجهیز توربین بادی را از تقسیم ۸۷۶۰ (تعداد ساعات یک سال) بر متوسط زمان تعمیر آن تجهیز (بر حسب ساعت) به دست آورد. نرخ تعمیر به دست آمده به صورت تعداد تعمیر در سال خواهد بود. در شکل ۹ دسترس‌پذیری توربین بادی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص

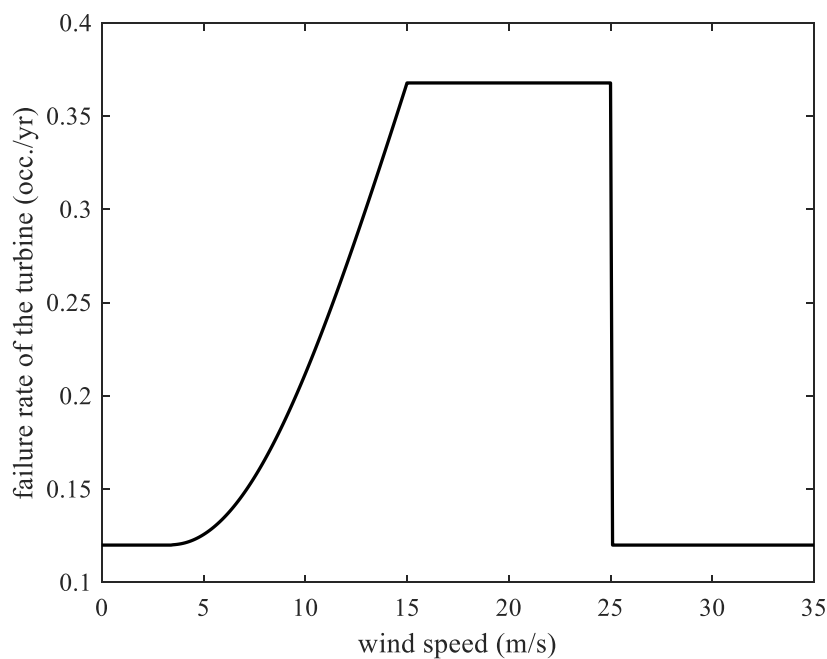
است شکل موج دسترس پذیری توربین، به منحنی توان توربین بادی شباهت دارد. در مورد توربین نرخ خرابی و در نتیجه دسترس پذیری آن به سرعت چرخش توربین وابسته است که سرعت چرخش توربین در سرعت‌های مختلف باد بر اساس منحنی توربین تعیین می‌شود.



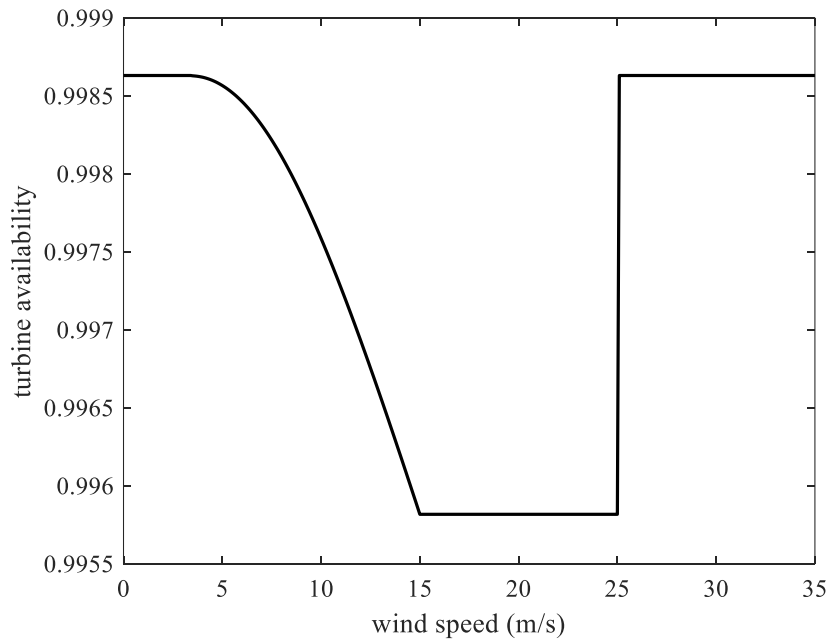
شکل (۷): تغییرات سرعت باد در منطقه منجیل به صورت ساعت به ساعت

جدول (۲): متوسط زمان تعمیر توربین بادی

تجهیز	متوسط زمان تعمیر
توربین	۱۰۰ ساعت

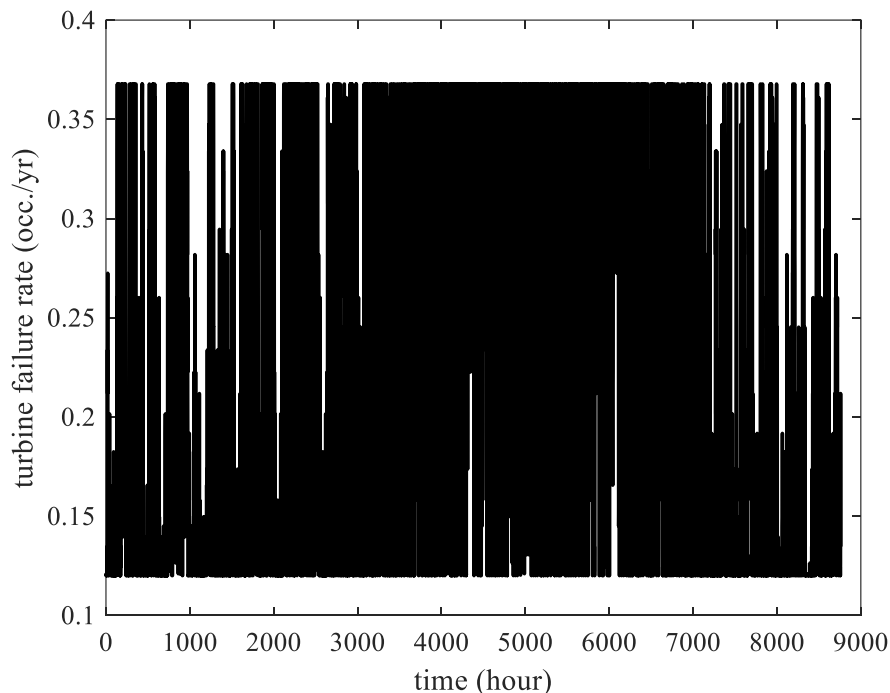


شکل (۸): نرخ خرابی توربین بادی بر حسب سرعت باد

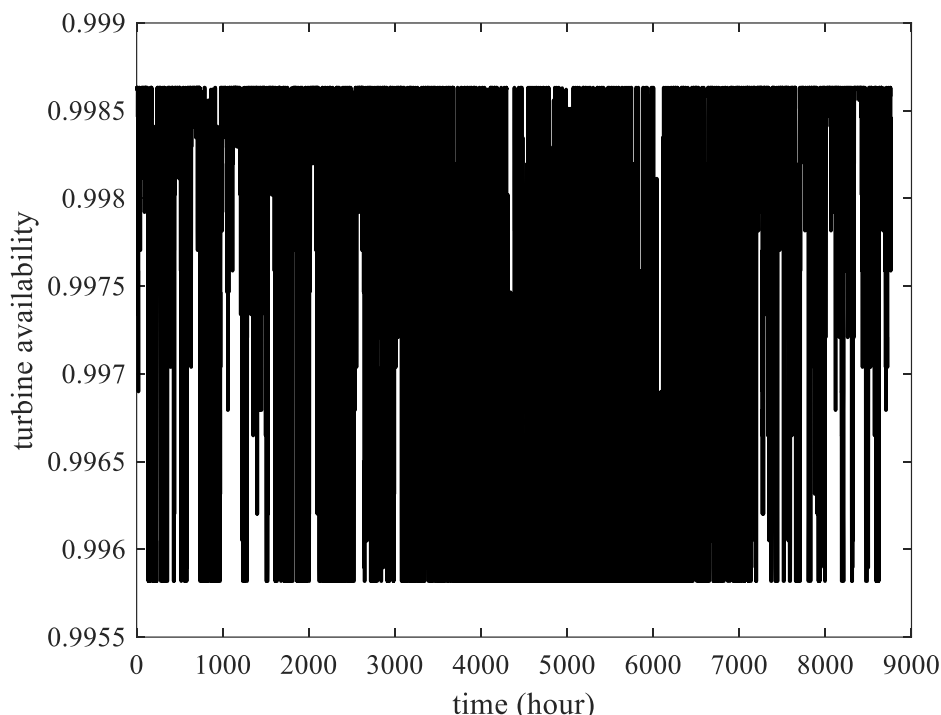


شکل (۹): نمودار دسترس‌پذیری توربین بر حسب سرعت باد

در شکل ۷ تغییرات ساعت به ساعت سرعت باد در منطقه منجیل نشان داده شده است. در این بخش با توجه به این الگوی تغییر سرعت باد و بر اساس نمودارهای نرخ خرابی و دسترس‌پذیری که بر حسب سرعت باد به دست آورده شد، نمودار ساعت به ساعت تغییرات نرخ خرابی توربین بادی مورد استفاده در نیروگاه، محاسبه می‌شود. برای این کار ابتدا در هر ساعت بر اساس شکل ۷ میزان سرعت باد مشخص می‌شود و سپس بر اساس نمودارهای به دست آورده شده نرخ خرابی و دسترس‌پذیری تعیین می‌گردد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودار نرخ خرابی توربین بادی در طول هر ساعت از سال و دسترس‌پذیری آن رسم شده است.



شکل (۱۰): نمودار نرخ خرابی توربین در طول سال



شکل (۱۱): نمودار دسترس‌پذیری توربین در طول سال

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی و دسترس‌پذیری توربین بادی به عنوان یکی از تجهیزات اصلی تشکیل دهنده نیروگاه‌های بادی مورد مطالعه قرار گرفت. برای تحلیل قابلیت اطمینان پره‌های روتور در برابر شکست خمشی ناشی از بارهای شدید، ابتدا یک مدل توصیفی از شکست سازه‌های پره‌ها تدوین شد. در این مدل، پارامترهای نامطمئن از جمله عدم قطعیت‌های مربوط به خود مدل به عنوان متغیرهای تصادفی پایه در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از این مدل، تابع حالت حدی $G \geq 0$ نشان‌دهنده شکست پره می‌باشد. تابع حالت حدی به صورت تابعی از متغیرهای تصادفی پایه بوده و احتمال شکست پره بر اساس آن به دست آورده شد. مدل‌سازی آشفستگی که به طور ایده‌آل باید بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در ارزیابی سایت انجام شود، منبع دیگری از عدم قطعیت مدل است. به منظور بیان نمودن عدم قطعیت مربوط به ممان خمشی قسمت انتهایی توربین از یک متغیر تصادفی استفاده می‌شود. این متغیر تصادفی توزیع نرمال داشته و مقدار میانگین و کوواریانس آن به ترتیب ۱ و ۰/۱۵ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین این متغیر تصادفی دارای انحراف معیار ۰/۳۹ خواهد بود. بنابراین بر اساس روابط بیان شده مقدار احتمال خرابی توربین مورد مطالعه را در سرعت‌های مختلف به دست آورده شد و سپس با داشتن نرخ تعمیر توربین بادی، نرخ خرابی توربین بادی بر اساس روابط مربوطه به دست آمد. در این تحقیق یک مدل مارکوف دو حالت برای توربین نیروگاه در نظر گرفته می‌شود. این مدل مارکوف شامل دو حالت سالم و خراب می‌باشد. بنابراین می‌توان با داشتن احتمال حالت خراب و نرخ تعمیر یک تجهیز، مقدار نرخ خرابی آن تجهیز محاسبه می‌گردد. با شبیه‌سازی یک نیروگاه بادی که در منطقه منجیل ایران نصب شده است و بر اساس داده‌های سرعت ساعت به ساعت باد در این منطقه روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس روش ارائه شده اثر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی و دسترس‌پذیری توربین بادی مطالعه شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد در مورد توربین بادی با زیاد شدن سرعت باد، نرخ خرابی زیاد می‌شود که این تغییرات بر اساس تابع محدودیت به دست آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد نرخ خرابی توربین بادی مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی به سرعت باد وابسته است و لذا در مطالعه دقیق قابلیت اطمینان، تغییرات سرعت باد باید لحاظ شود. به علاوه شکل موج نرخ خرابی توربین بادی، به منحنی توان توربین شبیه است. زیرا نرخ

خرابی توربین به سرعت چرخش توربین، وابسته است. بر همین اساس چون سرعت چرخش توربین و توان واحد بادی بر اساس منحنی توان توربین تعیین می‌شوند وابستگی نرخ خرابی این تجهیزات به منحنی توان توربین وجود دارد.

References

مراجع

- [1] Pérez, Jesús María Pinar, et al. "Wind turbine reliability analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 463-472, 2013.
- [2] Walford, Christopher A. *Wind turbine reliability: understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs*. No. SAND2006-1100. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2006.
- [3] Artigao, Estefania, et al. "Wind turbine reliability: A comprehensive review towards effective condition monitoring development", *Applied energy*, vol. 228, pp. 1569-1583, 2018.
- [4] Dao, Cuong, Behzad Kazemtabrizi, and Christopher Crabtree. "Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy", *Wind Energy*, vol. 22, no. 12, pp. 1848-1871, 2019.
- [5] Tavner, Peter, et al. "Influence of wind speed on wind turbine reliability", *Wind Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 55-72, 2006.
- [6] Echavarria, Erika, et al. "Reliability of wind turbine technology through time", *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 30, no. 3, 2008.
- [7] Pfaffel, Sebastian, Stefan Faulstich, and Kurt Rohrig. "Performance and reliability of wind turbines: A review", *Energies*, vol. 10, no. 11, pp. 1904, 2017.
- [8] Val, Dimitri V., Leon Chernin, and Daniil V. Yurchenko. "Reliability analysis of rotor blades of tidal stream turbines", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 121, pp. 26-33, 2014.
- [9] Meng, Debiao, et al. "Reliability analysis of wind turbine gearboxes: past, progress and future prospects", *International Journal of Structural Integrity*, vol. 16, no. 1, pp. 4-38, 2025.
- [10] Budisetyawan, Dwi, et al. "Wind Turbine Reliability Forecast: A Technical Review on the Research Milestone and Assessment of the Energy Cost Using Monte Carlo Simulation", *Engineered Science*, vol. 35, 1502, 2025.
- [11] Zhang, Ruixing, et al. "Reliability analysis and inverse optimization method for floating wind turbines driven by dual meta-models combining transient-steady responses", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 244, 109957, 2024.