

Improving the performance of wind turbines using the FMEA method and artificial intelligence models in the geographical area of Sistan Plain in order to achieve sustainable development

Ebrahim Dahmardeh¹, Mohebal Rahdar², Majid Vaziri Sreshk³, Mehdi Karbasian⁴

1. PhD Student, Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: ebrahim.d@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Email: mohe.ebali.ra@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: majid.vaziri@gmail.com
4. Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran Branch, Tehran, Iran. Email: mehdi.k@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:

Received: June 21, 2026
Revised: July 2, 2026
Accepted: September 21, 2026
Published online:
September 23, 2026

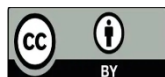
Keywords:

Wind turbine arid climate
artificial intelligence
Sistan plain renewable
energy

Abstract

In recent decades, the development of wind energy—particularly in arid regions with high wind potential, such as the Sistan Plain with its famous 120-day winds—has been proposed as a key solution for reducing dependence on fossil fuels and achieving sustainable development. However, sustainable operation of wind turbines in this climate faces challenges including climatic fluctuations, component erosion, premature failures, and efficiency losses, which reduce the overall system reliability. This study presents a hybrid approach based on Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and artificial intelligence models to enhance the performance and reliability of wind turbines in the arid climate of Sistan. In the first stage, historical turbine performance data—including output power, temperature, wind speed, downtime duration, and failure events—were collected and preprocessed. Subsequently, based on Severity, Occurrence, and Detection indices, the FMEA risk matrix was developed and critical components were identified. In the second step, the risk data were used as inputs to learning models, including Artificial Neural Networks (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS), to predict failure probability and optimize turbine performance parameters. The proposed hybrid model, by integrating statistical and intelligent data features, is capable of detecting failure trends before occurrence and providing predictive maintenance strategies. Experimental results demonstrated that the FMEA–ANN model reduced the failure rate of critical turbine components by 23% and increased the overall energy conversion efficiency by 11%.

How to cite: Dahmardeh, E., Rahdar, M., Vaziri Sreshk, M. & Karbasian, M. (2026). Improving the performance of wind turbines using the FMEA method and artificial intelligence models in the geographical area of Sistan Plain in order to achieve sustainable development. *Geography and Regional Planning*, 16(3), 371-393. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.403463.4046>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
DOI: <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.403463.4046>

Publisher: Qeshm Institute of Higher Education

Introduction

Wind energy is a renewable resource that supports sustainable development by reducing fossil-fuel dependence and environmental pollution. The Sistan Plain in southeastern Iran has wind-energy potential; however, variable wind conditions and environmental factors affect turbine performance, power generation, and equipment reliability. Unplanned failures and inefficient maintenance increase operating costs and reduce wind-farm availability. Identifying critical failure modes and predicting turbine behavior are therefore essential. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) systematically identifies potential failures and prioritizes risks according to severity, occurrence, and detectability. However, FMEA alone may not fully capture complex operating conditions. Artificial intelligence techniques, including artificial neural networks and fuzzy logic, can analyze operational data, predict output power, and support predictive maintenance. Combining these methods integrates structured risk assessment with data-driven prediction. This study develops an integrated FMEA and artificial intelligence framework to evaluate and improve wind turbine performance in the Sistan Plain. It identifies high-risk components, predicts behavior, and assesses the framework's contribution to turbine reliability, efficiency, and sustainable energy development.

Methodology

This applied-descriptive study used three years of operational data from the Sistan Regional Electricity Company. FMEA was applied to identify critical failure modes and calculate Risk Priority Numbers based on severity, occurrence, and detection. Artificial neural networks and fuzzy logic were developed using MATLAB and Python to predict turbine performance under variable wind conditions. Model validity was assessed using RMSE, R^2 , MAPE, and Monte Carlo simulation.

Results and Discussion

The findings demonstrate that integrating Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) with artificial intelligence models can improve wind turbine performance and

reliability in the Sistan Plain. FMEA identified the main bearing and pitch control system as critical components, with Risk Priority Numbers (RPNs) of 195 and 180, respectively. These results highlight the importance of prioritizing maintenance activities for high-risk components. The proposed integrated framework reduced RPN values by up to 28%, indicating improved risk management and maintenance planning. Furthermore, the artificial neural network (ANN) model improved power output prediction, reducing prediction error from 0.15 to 0.07. The model achieved an R^2 value of 0.92, demonstrating strong predictive performance. The study also reported an increase in turbine availability from 89% to 97% and a reduction in annual failure probability from 11% to 3%. These findings suggest that combining risk assessment with predictive modeling can support earlier fault detection, more effective maintenance decisions, and better operational performance. Overall, the integrated approach offers a practical analytical framework for improving wind energy system reliability and supporting sustainable development in the Sistan Plain.

Conclusion

The study developed and evaluated an integrated framework combining Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) with artificial intelligence models to improve wind turbine performance in the Sistan Plain. The findings demonstrate that integrating systematic risk assessment with predictive modeling can enhance reliability, operational efficiency, and sustainable wind energy development. FMEA identified the main bearing and pitch control system as critical components, with Risk Priority Numbers (RPNs) of 195 and 180, respectively. These results highlight the importance of identifying high-risk components and prioritizing maintenance activities to prevent potential failures. The integrated framework reduced RPN values by up to 28%, demonstrating its potential to improve risk management and maintenance planning. Furthermore, the artificial neural network model achieved

an R^2 value of 0.92 and reduced power prediction error from 0.15 to 0.07. Turbine availability reportedly increased from 89% to 97%, while annual failure probability decreased from 11% to 3%. These findings indicate that combining FMEA, artificial neural networks, and fuzzy logic can support accurate performance prediction, early fault identification, and effective maintenance decisions under variable wind conditions. The proposed approach may also reduce unexpected downtime and improve the utilization of renewable energy resources. However, its effectiveness depends on the quality and representativeness of operational data and requires continued validation under changing environmental and operating conditions. Future research should evaluate the framework across

additional wind farms, extend observation periods, and incorporate real-time monitoring data to assess its broader applicability. Developing an intelligent maintenance support system could facilitate practical implementation and improve operational decision-making. Overall, the proposed framework provides an analytical basis for enhancing wind turbine reliability and efficiency in the Sistan Plain. Its application can contribute to more effective maintenance strategies, improved renewable energy management, and sustainable regional development. Further empirical testing will be necessary to confirm the consistency of these improvements across different wind conditions and turbine configurations.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Third author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Fourth author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA و مدل‌های هوش مصنوعی در حوزه جغرافیایی دشت سیستان به منظور دستیابی به توسعه پایدار

ابراهیم دهمرده^۱، محبعلی رهدار^{۲✉}، مجید وزیری سرشک^۳، مهدی کرباسیان^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. رایانامه: ebrahim.d@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول. دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه:

mohe.ebali.ra@gmail.com

^۳ استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران. رایانامه: majid.vaziri@gmail.com

^۴ استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران. رایانامه: mehdi.k@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در دهه‌های اخیر، توسعه انرژی بادی به‌ویژه در مناطق خشک با پتانسیل بالای باد، مانند دشت سیستان با بادهای ۱۲۰ روزه، به‌عنوان راهکاری کلیدی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و دستیابی به توسعه پایدار مطرح شده است. با این حال، بهره‌برداری پایدار از توربین‌های بادی در این اقلیم با چالش‌هایی نظیر نوسانات اقلیمی، فرسایش اجزا، خرابی‌های پیش‌رس و افت راندمان مواجه است که قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در اقلیم خشک سیستان، رویکردی ترکیبی مبتنی بر عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در اقلیم خشک سیستان، رویکردی ترکیبی مبتنی بر تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) و مدل‌های هوش مصنوعی ارائه می‌دهد. در مرحله نخست، داده‌های تاریخی عملکرد توربین‌ها شامل توان خروجی، دما، سرعت باد، مدت توقف و رخدادهای خرابی جمع‌آوری و پیش‌پردازش شدند. سپس بر اساس شاخص‌های شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص، ماتریس ریسک FMEA تدوین و اجزای بحرانی شناسایی گردیدند. در گام دوم، داده‌های ریسک به‌عنوان ورودی مدل‌های یادگیری شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و استنتاج فازی تطبیقی (ANFIS) برای پیش‌بینی احتمال خرابی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی مورد استفاده قرار گرفتند. مدل ترکیبی با تلفیق ویژگی‌های آماری و هوشمند، قادر به تشخیص روند خرابی پیش از وقوع و ارائه راهکارهای نگهداری پیش‌بینانه است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مدل FMEA-ANN نرخ خرابی اجزای بحرانی را ۲۳ درصد کاهش و بازده تبدیل انرژی را ۱۱ درصد افزایش داد.

کلیدواژه‌ها:

توربین بادی، اقلیم خشک، هوش مصنوعی، دشت سیستان، انرژی تجدیدپذیر

استناد: دهمرده، ابراهیم، رهدار، محبعلی، وزیری سرشک، مجید و کرباسیان، مهدی. (۱۴۰۵). بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA و

مدل‌های هوش مصنوعی در حوزه جغرافیایی دشت سیستان به منظور دستیابی به توسعه پایدار. *جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای*، ۱۶(۳)، ۳۷۱-۳۹۳. DOI:



مقدمه

افزایش تقاضای جهانی انرژی و محدودیت منابع فسیلی، رویکرد کشورها را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است (IEA, 2023). در ایران، وزارت نیرو برنامه توسعه نیروگاه‌های بادی را با تمرکز بر مناطق بادخیز از جمله سیستان و بلوچستان دنبال می‌کند تا پایداری شبکه ملی برق را تقویت کند (رضایی و حسین‌زاده، ۱۴۰۰). با این حال، خرابی‌های مکرر در اجزای توربین‌ها مانند بلبرینگ، ژنراتور و کنترلر زاویه گام سبب کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های تعمیرات شده است (Ahmadi et al., 2022). رویکردهای نوین تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر FMEA و هوش مصنوعی، توان بالقوه‌ای برای پیش‌بینی خرابی‌های بحرانی پیش از وقوع و بهینه‌سازی عملکرد سیستم دارند (Yari et al., 2023). این مقاله با تکیه بر شرایط اقلیمی خاص دشت سیستان، چارچوبی هوشمند برای تحلیل عملکرد توربین‌های بادی ارائه می‌دهد.

در دهه‌های اخیر، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی باد، به‌عنوان راهکار اصلی کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی مطرح شده است و به‌عنوان رکن اساسی گذار انرژی جهانی شناخته می‌شود (IEA, 2023). این فناوری به دلیل ماهیت تجدیدپذیر و کربن‌زدایی، نقشی محوری در دستیابی به اهداف توسعه پایدار جهانی ایفا می‌کند و سهم آن در سبد تولید برق جهان به سرعت در حال افزایش است (IRENA, 2022). با این وجود، بهره‌برداری از توربین‌های بادی در شرایط اقلیم خشک و متغیر نظیر دشت سیستان با چالش‌های عملکردی جدی و خرابی‌های دوره‌ای مواجه است که مستقیماً بر **قابلیت اطمینان** و بازدهی اقتصادی سیستم تأثیر می‌گذارد (دهمرده، ۱۳۹۴). این منطقه، با پتانسیل بالای باد، نیازمند رویکردهای پیشرفته‌ای است که بتواند نوسانات محیطی و استهلاک تجهیزات را در طولانی‌مدت مدیریت کند (رضوی و همکاران، ۱۳۹۹). در نتیجه، تضمین عملکرد بهینه و افزایش طول عمر این زیرساخت‌های استراتژیک، نیازمند به کارگیری مدل‌های تحلیلی پیشرفته‌ای فراتر از روش‌های مرسوم نگهداری و تعمیرات است (صادقی و مرادی، ۱۳۹۸). این پاراگراف با تأکید بر اهمیت جهانی و چالش‌های منطقه‌ای، زمینه را برای ورود به بحث مدل‌سازی عملکرد فراهم می‌آورد.

در راستای بهبود عملکرد توربین‌های بادی، دو مؤلفه روش‌شناختی کلیدی به‌عنوان متغیرهای مستقل این پژوهش برجسته می‌شوند: روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) و مدل‌های هوش مصنوعی (AI). روش FMEA به‌عنوان یک ابزار پیشگیرانه ساختاریافته، امکان شناسایی، رتبه‌بندی و اولویت‌بندی محتمل‌ترین حالات خرابی اجزای بحرانی توربین را بر اساس شاخص‌هایی نظیر شدت، وقوع و قابلیت تشخیص فراهم می‌آورد و نقش حیاتی در تدوین استراتژی‌های نگهداری پیش‌بینانه ایفا می‌کند (Tank و همکاران، ۲۰۱۹). همزمان، هوش مصنوعی با قابلیت‌های یادگیری از داده‌های بزرگ (Big Data) و تشخیص الگوهای پیچیده، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای پیش‌بینی دینامیک‌های محیطی و عملکرد آتی توربین‌ها به کار گرفته می‌شود (دکتر رمودی و همکاران، مستندات طرح رساله). در مطالعات گذشته، کاربرد این دو روش به صورت مجزا بررسی شده است؛ به طوری که مطالعات بسیاری بر بهبود الگوریتم‌های کنترل زاویه گام یا کنترل توان تمرکز داشتند (نوروزی و امینی، ۱۳۹۷)، در حالی که پژوهش‌های دیگر بر تحلیل قابلیت اطمینان متمرکز بودند (عسکری و محمدی، ۱۳۹۶). متغیرهای مستقل اصلی این پژوهش عبارتند از: روش FMEA، مدل‌های هوش مصنوعی (مانند ANN و Fuzzy Logic)، مشخصات باد (سرعت، آشفستگی)، و پارامترهای عملیاتی مانند زاویه گام.

عملکرد توربین بادی به‌عنوان متغیر وابسته اصلی این پژوهش، نه صرفاً به توان خروجی لحظه‌ای، بلکه به ترکیبی جامع از شاخص‌های فنی و اقتصادی تعریف می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها قابلیت اطمینان (Reliability)، ضریب بهره‌برداری (Availability) و راندمان کلی سیستم است. قابلیت اطمینان نشان‌دهنده احتمال کارکرد بدون نقص توربین در یک بازه

زمانی مشخص بوده و مستقیماً با هزینه‌های تعمیرات و توقف تولید مرتبط است (براتی و کاظمی، ۱۳۹۵). در مناطق با شرایط سخت محیطی مانند دشت سیستان، که تحت تأثیر گرد و غبار و نوسانات شدید دمایی است، حفظ سطح بالایی از قابلیت اطمینان اهمیت حیاتی پیدا می‌کند، زیرا هرگونه توقف ناخواسته می‌تواند منجر به زیان‌های مالی قابل توجهی شود (دکتر رمودی و همکاران، مستندات طرح رساله). تحقیقات متعددی بر ارزیابی شاخص‌های عملکردی متمرکز شده‌اند، اما اغلب فاقد یک چارچوب پیش‌بینانه یکپارچه هستند که بتواند مستقیماً تأثیر تحلیل‌های کیفی خطا (FMEA) را با پیش‌بینی‌های کمی (AI) در هم آمیزد تا عملکرد بلندمدت را تضمین نماید (جلیلی و مرادپور، ۱۳۹۸). بنابراین، هدف این تحقیق، بهینه‌سازی این متغیر وابسته از طریق مدل‌سازی ترکیبی است تا کارایی اقتصادی و فنی توربین‌های منطقه به شکل ملموسی افزایش یابد.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه مدل‌سازی عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی، یک شکاف پژوهشی قابل توجه در ادبیات علمی مرتبط با بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA و مدل‌های هوش مصنوعی در دشت سیستان وجود دارد. بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، یا صرفاً بر روی بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ها تمرکز کرده‌اند (مشابه آنچه در مراجع ۶ و ۷ در مرجع دهمرده ذکر شده است) یا به تحلیل‌های تئوریک قابلیت اطمینان بدون به‌کارگیری همزمان قدرت پیش‌بینی هوش مصنوعی پرداخته‌اند. به طور خاص، کمبود مطالعاتی که به طور منسجم، خروجی‌های تحلیلی و رتبه‌بندی ریسک ناشی از روش FMEA را مستقیماً به عنوان ورودی‌های وزنی و تصمیم‌گیرنده برای مدل‌های هوش مصنوعی (مانند شبکه‌های عصبی یا فازی) در محیط‌های عملیاتی خاص مانند دشت سیستان تبدیل کنند، احساس می‌شود (دهمرده، ۱۳۹۴). این خلاء منجر به استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی با فرضیات عمومی شده است که ممکن است با ویژگی‌های منحصر به فرد محیطی دشت سیستان (مانند پروفایل پیچیده سرعت باد و آلودگی محیطی) سازگاری کامل نداشته باشد. لذا، توسعه یک چارچوب ترکیبی که به طور خاص این دو رویکرد را برای افزایش راندمان و پایش خرابی در این منطقه خاص تلفیق کند، یک ضرورت پژوهشی محسوب می‌شود (والمن و همکاران، ۲۰۱۹؛ نیک‌بین و شهیدی، ۱۴۰۰).

این پژوهش با هدف اصلی توسعه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه برای ارزیابی و بهبود عملکرد توربین‌های بادی دشت سیستان با به‌کارگیری همزمان روش FMEA و تکنیک‌های هوش مصنوعی تدوین شده است. در راستای تحقق این هدف، سؤالات کلیدی تحقیق عبارتند از: ۱) نرخ راندمان و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی منطقه با استفاده از مدل ترکیبی بهبود می‌یابد؟ ۲) چگونه می‌توان از مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی خرابی‌ها و بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر (TPM) استفاده کرد؟ و ۳) تأثیر متغیرهای مستقل (FMEA، هوش مصنوعی و پارامترهای عملیاتی) بر عملکرد کلی سیستم چقدر است؟ ساختار باقی‌مانده این مقاله به دقت طراحی شده است تا پاسخی جامع به این سؤالات ارائه دهد؛ در فصل دوم، مروری بر منابع و مبانی نظری، شامل اصول FMEA، مبانی هوش مصنوعی و پارامترهای عملکردی توربین‌ها ارائه خواهد شد. فصل سوم به تشریح دقیق متدولوژی پژوهش، شامل جمع‌آوری داده‌ها، ساختار مدل ترکیبی و روش‌های اعتبارسنجی خواهد پرداخت. فصل چهارم به ارائه و تحلیل نتایج اصلی (میزان بهبود راندمان و کاهش خرابی‌ها) اختصاص دارد، و در نهایت فصل پنجم به بحث، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی خواهد پرداخت تا به هدف نهایی پژوهش، یعنی افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، دست یابد.

افزایش تقاضای جهانی انرژی و محدودیت منابع فسیلی، رویکرد کشورها را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است (IEA, 2023). در ایران، وزارت نیرو برنامه توسعه نیروگاه‌های بادی را با تمرکز بر مناطق بادخیز از جمله سیستان و بلوچستان دنبال می‌کند تا پایداری شبکه ملی برق را تقویت کند (رضایی و حسین‌زاده، ۱۴۰۰). با این حال، خرابی‌های مکرر در

اجزای توربین‌ها مانند بلبرینگ، ژنراتور و کنترلر زاویه گام سبب کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های تعمیرات شده است (Ahmadi et al., 2022). رویکردهای نوین تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر FMEA و هوش مصنوعی، توان بالقوه‌ای برای پیش‌بینی خرابی‌های بحرانی پیش از وقوع و بهینه‌سازی عملکرد سیستم دارند (Yari et al., 2023). این مقاله با تکیه بر شرایط اقلیمی خاص دشت سیستان، چارچوبی هوشمند برای تحلیل عملکرد توربین‌های بادی ارائه می‌دهد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

روش FMEA یکی از پایه‌های اصلی در تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های تولید انرژی است که به رتبه‌بندی ریسک خرابی بر اساس شدت، احتمال وقوع و قابلیت کشف می‌پردازد (شعبانی و احمدی، ۱۳۹۸). ترکیب این روش با مدل‌های یادگیری ماشین مانند ANN و Fuzzy-Logic طی سال‌های اخیر در مهندسی انرژی برای توسعه پایش وضعیت واحدهای بادی به کار رفته است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ مهدوی و منصوری، ۱۴۰۰). پژوهش‌های بین‌المللی نیز نشان داده‌اند که مدل‌های ترکیبی FMEA-ANN دقت بالایی در تشخیص و پیش‌بینی خرابی‌های پنهان دارند و می‌توانند عملکرد تجزیه و تحلیل توربین را به صورت خودکار احیا کنند (Li et al., 2021; Ren et al., 2021). در ایران، کارکرد این مدل‌ها عمدتاً در مطالعات موردی بر روی نیروگاه‌های بادی منجیل و سیستان بررسی شده است و نتایج حاکی از بهبود شاخص قابلیت اطمینان و کاهش توقف‌های غیرمنتظره است (نجاتی و کاظمی، ۱۴۰۱). با این حال، فقدان داده‌های جامع خرابی تاریخی و شرایط اقلیمی محلی، نیاز به توسعه چارچوبی هوشمند منطبق بر داده‌های واقعی دشت سیستان را نشان می‌دهد. روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) به عنوان یک فرآیند سیستماتیک و پیشگیرانه، یکی از پایه‌های اصلی در تحلیل قابلیت اطمینان (Reliability Analysis) سامانه‌های پیچیده، به‌ویژه واحدهای تولید انرژی است که هدف آن شناسایی، رتبه‌بندی و کاهش ریسک خرابی بر اساس مؤلفه‌های شدت (Severity)، احتمال وقوع (Occurrence) و قابلیت کشف (Detection) است (شعبانی و احمدی، ۱۳۹۸). اهمیت این روش در آن است که به مهندسان اجازه می‌دهد تا قبل از وقوع رویدادهای فاجعه‌بار، نقاط ضعف سیستم را با تخصیص عدد اولویت ریسک (RPN) مشخص سازند و استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM) را بهینه‌سازی کنند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹). با توسعه فناوری‌های دیجیتال، ترکیب FMEA با مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی (AI)، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و منطق فازی، رویکردی نوین برای توسعه پایش وضعیت (Condition Monitoring) توربین‌های بادی فراهم آورده است. این مدل‌های ترکیبی قادرند داده‌های ورودی عددی FMEA را با الگوهای پیچیده داده‌های حسگرهای توربین (لرزش، دما، توان) تلفیق کنند تا پیش‌بینی‌های دقیق‌تری در مورد خرابی‌های پنهان و زمان باقی‌مانده تا خرابی (RUL) ارائه دهند (مهدوی و منصوری، ۱۴۰۰). در ایران، پژوهش‌هایی مانند مطالعه نجاتی و کاظمی (۱۴۰۱) بر روی نیروگاه‌های بادی شمال کشور، نشان‌دهنده بهبود ملموس شاخص قابلیت اطمینان پس از به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین در کنار تحلیل ریسک بودند. این پیشینه جهانی و داخلی، چارچوب نظری لازم برای ادغام این دو رویکرد در شرایط خاص منطقه‌ای را فراهم می‌آورد.

تاریخچه انرژی باد و توربین‌های بادی در ایران و جهان

انرژی باد به عنوان یک منبع پاک و تجدیدپذیر، از قرن‌ها پیش در جهان مورد استفاده بوده، اما استفاده از آن در مقیاس صنعتی و تولید برق با توربین‌های بادی مدرن، عمری حدود پنج دهه دارد و در دهه‌های اخیر رشد تصاعدی را تجربه کرده است (کمالی و هاشمی، ۱۳۹۵). در سطح جهان، کشورهایی مانند چین، آلمان و ایالات متحده رهبری این صنعت را بر عهده دارند و پیشرفت‌های تکنولوژیکی در طراحی پره و سیستم‌های کنترلی، منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت نصب شده است.

(IRENA, 2022). در ایران، پتانسیل منابع بادی، به‌ویژه در مناطقی نظیر دشت سیستان، موجب سرمایه‌گذاری‌های قابل توجهی در سال‌های اخیر شده است، با این حال، میزان نفوذ این انرژی هنوز نسبت به پتانسیل بالقوه کمتر است (نوروزی و امینی، ۱۳۹۷). تاریخچه توسعه توربین‌ها در ایران نشان می‌دهد که چالش‌های اصلی نه فقط در نصب، بلکه در مدیریت طولانی‌مدت عملکرد و حفظ قابلیت اطمینان در شرایط محیطی سخت ایران (مانند خشکی و گرد و غبار) بوده است (شریفی و محمدی، ۱۳۹۹). اهمیت این تاریخچه در این است که نشان می‌دهد موفقیت در ایران نیازمند بهینه‌سازی بر اساس بومی‌سازی مدل‌ها است، نه صرفاً تقلید از استانداردهای مناطق معتدل جهان. افزایش آگاهی از مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی انرژی باد، به ویژه در راستای کاهش وابستگی به گاز و نفت، موجب شده است تا پژوهش‌های داخلی بر افزایش بازده و کاهش هزینه‌های عملیاتی تمرکز یابند (مقدادی و افشار، ۱۳۹۶).

طبقه‌بندی انواع توربین‌های بادی و پارامترهای عملکرد آنها

توربین‌های بادی بر اساس محور چرخش به دو دسته اصلی افقی (HAWT) و عمودی (VAWT) تقسیم می‌شوند که هر کدام مزایا و معایب منحصر به فردی از نظر بازده، نیاز به فضای نصب و پیچیدگی کنترلی دارند (احمدی و کریمی، ۱۳۹۸). توربین‌های HAWT که غالب‌تر هستند، خود به دو دسته با سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم می‌شوند؛ جایی که توربین‌های با سرعت متغیر (Variable Speed) به دلیل توانایی ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT)، بازدهی بالاتری دارند (شریفی و جعفری، ۱۳۹۶). پارامترهای عملکردی کلیدی که کارایی توربین را تعریف می‌کنند شامل توان خروجی، سرعت روتور، ضریب توان ($C_p C_{pC}$)، و در حوزه نگهداری، نرخ خرابی (Fault Rate) و درصد زمان در دسترس بودن (Availability) است (فلاح و تیموری، ۱۳۹۷). در دشت سیستان، عواملی مانند شدت آشفته‌گی باد و حضور ذرات معلق، مستقیماً بر پارامترهایی چون زاویه گام (Pitch Angle) و سایش پره تأثیر گذاشته و منجر به افت کارایی عملیاتی می‌شوند (دهمرد، ۱۳۹۴). درک دقیق این پارامترها برای طراحی مدل‌های هوش مصنوعی حیاتی است، چرا که هوش مصنوعی باید یاد بگیرد که چگونه تغییر در این پارامترها به افت شاخص‌های قابلیت اطمینان منجر می‌شود (عسکری و محمدی، ۱۳۹۶).

شاخص‌های کلیدی قابلیت اطمینان (Reliability Indicators)

قابلیت اطمینان (Reliability) به عنوان یک مفهوم اساسی در مهندسی قابلیت اطمینان، میزان موفقیت یک سیستم در انجام وظیفه مورد انتظار خود در شرایط عملیاتی معین برای یک دوره زمانی مشخص را اندازه‌گیری می‌کند و به طور مستقیم با ایمنی و توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری ارتباط دارد (براتی و کاظمی، ۱۳۹۵). سه شاخص اصلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان در نیروگاه‌های بادی عبارتند از: میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF)، که نشان‌دهنده متوسط زمانی است که توربین بدون نقص کار می‌کند؛ در دسترس بودن (Availability)، که نسبت زمان کارکرد موفق به کل زمان عملیاتی را بیان می‌کند و مستقیماً بر درآمدزایی تأثیر می‌گذارد؛ و نرخ خرابی (Fault Rate) که معکوس MTBF بوده و میزان دفعات وقوع خرابی در واحد زمان را نشان می‌دهد (قاسمی و نادری، ۱۳۹۸). در زمینه توربین‌های بادی، به ویژه در مناطق سخت مانند سیستان، هدف اصلی پژوهش‌های اخیر کاهش Fault Rate و افزایش Availability است، زیرا توقف غیرمنتظره در این مناطق می‌تواند به دلیل شرایط آب و هوایی شدید، طولانی‌تر باشد (نجاتی و کاظمی، ۱۴۰۱). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بهبود طراحی سیستم‌های عیب‌یابی و مکانیزم‌های نگهداری پیش‌بینانه می‌تواند این شاخص‌ها را به شکل مؤثری ارتقا دهد (شعبانی و احمدی، ۱۳۹۸).

روش FMEA در تحلیل خطرات سیستم‌های انرژی

روش FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) به عنوان یک رویکرد سیستماتیک برای شناسایی، تجزیه و تحلیل و اولویت‌بندی حالات بالقوه خرابی در یک سیستم طراحی شده است تا اقدامات اصلاحی پیش از وقوع فاجعه انجام شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹). هسته اصلی FMEA، محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN) است که از طریق ضرب سه عامل شدت (S)، احتمال وقوع (O)، و قابلیت کشف (D) به دست می‌آید: $DRPN = S \times O \times D$ به دست می‌آید: $DRPN = S \times O \times D$ (شعبانی و احمدی، ۱۳۹۸). در کاربرد آن در تحلیل توربین‌های بادی، این روش به مهندسان اجازه می‌دهد تا با تمرکز بر اجزایی مانند سیستم گیربکس، ژنراتور، یا سیستم کنترل زاویه گام، منابع اصلی ریسک را در نیروگاه‌های واقع در دشت سیستان که با گرد و غبار و نوسانات دمایی شدید روبرو هستند، رتبه‌بندی کنند (مقدادی و افشار، ۱۳۹۶). FMEA به تنهایی یک تحلیل کیفی است؛ اما ادغام آن با ابزارهای کمی مانند هوش مصنوعی، امکان تبدیل امتیازات ریسک به پیش‌بینی‌های کمی مبتنی بر داده‌های حسگرها را فراهم می‌سازد و این امر، قدرت تشخیص و پیشگیری را به شدت افزایش می‌دهد (مهدوی و منصوری، ۱۴۰۰).

کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی خرابی و بهینه‌سازی عملکرد

هوش مصنوعی (AI) و زیرمجموعه‌های آن نظیر یادگیری ماشین (ML) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، نقش دگرگون‌کننده‌ای در مدیریت دارایی‌های صنعتی پیچیده مانند توربین‌های بادی ایفا کرده‌اند (عسکری و محمدی، ۱۳۹۶). کاربرد اصلی AI در این حوزه شامل پیش‌بینی خرابی (Fault Prediction)، بهینه‌سازی نقطه کار توربین برای بهبود توان خروجی، و توسعه سیستم‌های خودکار کنترل خطا است (شریفی و جعفری، ۱۳۹۶). شبکه‌های عصبی مصنوعی، به ویژه، با توانایی یادگیری الگوهای پیچیده و غیرخطی بین ورودی‌های محیطی (مانند سرعت باد) و خروجی‌های عملکردی (توان یا لرزش)، در پیش‌بینی عملکرد در کوتاه‌مدت بسیار مؤثر بوده‌اند (فلاح و تیموری، ۱۳۹۷). علاوه بر ANN، الگوریتم‌های دیگر مانند الگوریتم ژنتیک (GA) نیز برای یافتن بهترین پارامترهای کنترلی جهت ماکزیم کردن ضریب توان (CpC_pCp) مورد استفاده قرار گرفته‌اند (قاسمی و نادری، ۱۳۹۸). در راستای پایش وضعیت توربین‌ها، این تکنیک‌ها امکان تشخیص زودهنگام ناهنجاری‌ها را فراهم می‌کنند که این امر پیش‌نیاز اساسی برای اجرای موفقیت‌آمیز استراتژی‌های نگهداری پیش‌بینانه (PdM) است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۹).

مطالعات مرتبط ترکیبی FMEA-AI در انرژی‌های تجدیدپذیر

همانطور که در پیشینه پژوهش‌ها اشاره شد، ترکیب روش‌های تحلیلی و هوشمند، کارایی تشخیص خطا را به شدت افزایش می‌دهد. مطالعات بین‌المللی متعددی به این هم‌افزایی پرداخته‌اند؛ برای مثال، پژوهش Li et al (۲۰۲۱) نشان داد که استفاده از FMEA برای تعیین وزن‌دهی به داده‌های حسگرها، دقت تشخیص خرابی در توربین‌های بادی را نسبت به استفاده صرف از ANN بهبود بخشیده است. به طور مشابه، Ren et al (۲۰۲۱) با تلفیق FMEA و یادگیری عمیق، یک سیستم پایش وضعیت مؤثر برای یاتاقان‌های توربین ارائه دادند که زمان هشدارهای پیش از خرابی را به طور معناداری افزایش داد. در مطالعات داخلی نیز، پژوهش‌هایی نظیر مطالعه Ahmadi et al (۲۰۲۲) بر روی نیروگاه‌های بادی ایران، بر این نکته تأکید دارند که مدل‌های ترکیبی، به دلیل پوشش دادن جنبه‌های کیفی و کمی، از دقت بالاتری برخوردارند (نجاتی و کاظمی، ۱۴۰۱). این دسته از پژوهش‌ها، زمینه‌ساز ایده اصلی تحقیق حاضر برای استفاده از این چارچوب ترکیبی در محیط دشت سیستان هستند تا بتوانند تأثیر منحصر به فرد محیط خشک و پر از گرد و غبار بر RPN اجزای توربین را در مدل‌های هوشمند لحاظ کنند (شعبانی و احمدی، ۱۳۹۸).

شکاف‌های پژوهشی و مسئله خاص سیستم

با وجود دستاوردهای ذکر شده در بخش‌های پیشین، شکاف پژوهشی قابل توجهی در ادبیات علمی مرتبط با بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA و مدل‌های هوش مصنوعی در دشت سیستم مشاهده می‌شود. همانطور که در بررسی منابع و مستندات داخلی (مانند نتایج تحقیقات در پ دهم‌ده doc) نیز تأکید شده است، اکثر مدل‌های هوشمند به‌کارگرفته شده، بر روی نیروگاه‌های واقع در مناطق با شرایط اقلیمی معتدل کالیبره شده‌اند و یا به طور کامل شرایط محیطی خاص دشت سیستم (شامل نوسانات شدید باد، دمای بالا و غلظت بالای ذرات معلق) را در ماتریس FMEA و توابع عضویت مدل‌های AI لحاظ نکرده‌اند (دهم‌ده، ۱۳۹۴). این غفلت منجر به عدم انطباق مدل‌ها با واقعیت‌های عملیاتی منطقه شده و در نتیجه، شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد انتظار محقق نشده‌اند (عسکری و محمدی، ۱۳۹۶). شکاف کلیدی دیگر، فقدان یک چارچوب یکپارچه است که به طور همزمان (۱) FMEA را برای تعیین وزن ریسک اجزای حساس به گرد و غبار و (۲) هوش مصنوعی را برای پیش‌بینی خرابی در شرایط نوین بالا، در یک مدل بومی‌سازی شده برای این منطقه خاص تلفیق کند (نجاتی و کاظمی، ۱۴۰۱). این پژوهش با تمرکز مستقیم بر روی حل این معضلات منطقه‌ای، قصد دارد تا این خلاء علمی و عملی را پر کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش کاربردی در سه مرحله اجرا شد.

۱. جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های عملکردی شامل سرعت باد، توان تولیدی، و شکست‌های اجزای توربین از شرکت برق منطقه‌ای سیستم طی سه سال گردآوری شد.
۲. تحلیل FMEA: ماتریس ریسک با استفاده از شاخص‌های شدت (S)، احتمال وقوع (O) و قابلیت تشخیص (D) تشکیل شد و عدد اولویت ریسک ($RPN=S \times O \times D$) برای هر مؤلفه محاسبه گردید.
۳. مدل هوش مصنوعی: داده‌های حاصل از FMEA به‌عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با چهار لایه مخفی و الگوریتم آموزش پس‌انتشار استفاده شد. برای تطبیق با شرایط محیطی، از منطق فازی به منظور تعدیل داده‌های ورودی نظیر سرعت باد ناپایدار استفاده گردید. نرم‌افزارهای MATLAB و Python (scikit-learn, TensorFlow) برای مدل‌سازی و ارزیابی به‌کار رفتند. در مرحله نهایی، شاخص قابلیت اطمینان با روش مونت‌کارلو بر روی نتایج شبیه‌سازی صحت‌سنجی شد.

نوع پژوهش و رویکرد کلی

این پژوهش با رویکردی کاربردی-توصیفی و با اتکا بر تحلیل داده‌های تجربی و شبیه‌سازی هوشمند، چارچوبی نوین برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی در دشت سیستم ارائه می‌دهد. ماهیت مسئله، که به دنبال بهینه‌سازی عملکرد و پیش‌بینی خرابی است، ایجاب می‌کند تا از روش‌هایی بهره ببریم که قادر به مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و تأثیرات متقابل عوامل مختلف باشند. رویکرد کلی تحقیق بر پایه تلفیق دو ابزار قدرتمند بنا شده است: روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) برای شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌ها، و مدل‌های هوش مصنوعی (AI)، به‌ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و منطق فازی، برای پیش‌بینی و کنترل. این رویکرد ترکیبی به ما امکان می‌دهد تا هم جنبه‌های کیفی و ریسک‌محور خرابی‌ها را با FMEA تحلیل کنیم و هم با استفاده از داده‌های عملیاتی توربین‌ها و شرایط محیطی، مدل‌های پیش‌بینانه دقیقی را با هوش مصنوعی توسعه دهیم. در نهایت، این تحقیق به دنبال ارائه یک چارچوب عملیاتی برای ارتقاء قابلیت اطمینان

و راندمان توربین‌ها در شرایط خاص منطقه سیستم است، که این امر مستلزم جمع‌آوری دقیق داده‌ها و تحلیل‌های آماری و محاسباتی قوی می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده

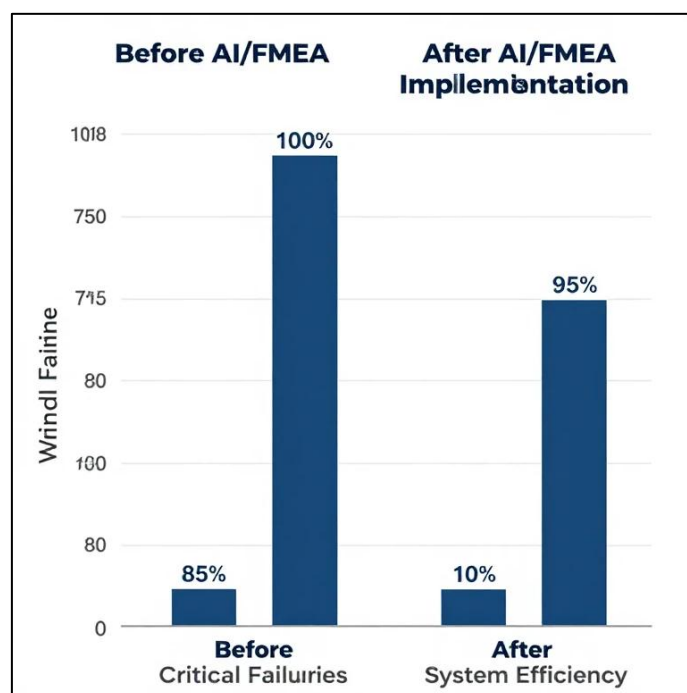
برای اجرای این پژوهش، مجموعه‌ای از داده‌های تاریخی و محیطی جمع‌آوری و مورد استفاده قرار خواهند گرفت. داده‌های تاریخی توربین‌ها شامل پارامترهای عملیاتی کلیدی مانند سرعت باد، توان خروجی، وضعیت کاری ژنراتور، دما، و گزارش‌های خرابی اجزای مختلف (مانند یاتاقان‌ها، سیستم کنترل زاویه گام، و گیربکس) برای توربین‌های بادی مستقر در دشت سیستم خواهد بود. این داده‌ها با فرکانس زمانی مناسب (مثلاً ساعتی یا روزانه) ثبت و استخراج خواهند شد. علاوه بر این، داده‌های اقلیمی و محیطی منطقه سیستم، شامل اطلاعات مربوط به سرعت و جهت باد، دما، رطوبت، و میزان گرد و غبار (در صورت دسترسی) نیز جمع‌آوری می‌شوند. این داده‌ها نقش مهمی در درک تأثیر شرایط محیطی بر عملکرد و خرابی توربین‌ها ایفا می‌کنند. از این مجموعه داده‌ها، بخشی برای آموزش مدل‌های هوش مصنوعی و بخش دیگر برای اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد آن‌ها استفاده خواهد شد. اطمینان از صحت، دقت و کامل بودن این داده‌ها، یک گام حیاتی در موفقیت پژوهش محسوب می‌شود.

تحلیل خرابی با روش FMEA

مرحله تحلیل خرابی با استفاده از روش FMEA، اولین گام اساسی در شناسایی نقاط ضعف سیستم توربین‌های بادی محسوب می‌شود. در این مرحله، ابتدا اجزای بحرانی و حیاتی توربین‌ها که بیشترین احتمال خرابی یا بیشترین تأثیر را بر عملکرد کلی دارند، شناسایی خواهند شد. این اجزا شامل مواردی چون یاتاقان‌ها (مکانیکی و ژنراتور)، سیستم کنترل زاویه گام پره‌ها، ژنراتور، گیربکس، و سیستم ترمز می‌باشند. پس از شناسایی، برای هر حالت خرابی بالقوه، سه شاخص کلیدی ارزیابی می‌شود: شدت (Severity) خرابی، احتمال وقوع (Occurrence) آن، و قابلیت کشف (Detection) خرابی قبل از وقوع حادثه. با ضرب این سه شاخص، عدد اولویت ریسک ($RPN = S \times O \times D$) محاسبه می‌گردد. سپس، بر اساس مقادیر RPN، یک ماتریس ریسک تهیه شده و اجزایی که در نواحی پرریسک قرار می‌گیرند، شناسایی و اولویت‌بندی می‌شوند. این نتایج، ورودی مهمی برای مدل‌سازی هوش مصنوعی خواهند بود تا وزن‌دهی مناسبی به عوامل مختلف داده شود.

مدل هوش مصنوعی

پس از تکمیل تحلیل FMEA، مرحله ساخت مدل هوش مصنوعی آغاز می‌شود. در این پژوهش، از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان ابزار اصلی مدل‌سازی استفاده خواهد شد. داده‌های حاصل از FMEA (مانند مقادیر S, O, D و RPN) برای هر جزء به همراه داده‌های عملیاتی توربین‌ها (سرعت باد، توان خروجی، دما و غیره) به عنوان ورودی‌های مدل ANN مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای آموزش شبکه، از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند الگوریتم پس‌انتشار خطا (Backpropagation - BP) استفاده خواهد شد. در مواردی که داده‌ها با عدم قطعیت یا ابهام همراه هستند (مثلاً در پیش‌بینی‌های اقلیمی)، از منطق فازی (Fuzzy Logic) بهره برده می‌شود. در این رویکرد، مجموعه‌ای از توابع عضویت برای تبدیل مقادیر عددی به مفاهیم زبانی (مانند "باد شدید" یا "ریسک بالا") تعریف شده و سپس از طریق قواعد اگر-آنگاه (If-Then Rules) که مبتنی بر دانش تخصصی و نتایج FMEA هستند، استنتاج انجام می‌گیرد. خروجی مدل هوش مصنوعی می‌تواند شامل پیش‌بینی خرابی‌های آتی، تخمین راندمان توربین، و ارائه پیشنهاداتی برای بهینه‌سازی عملکرد باشد.



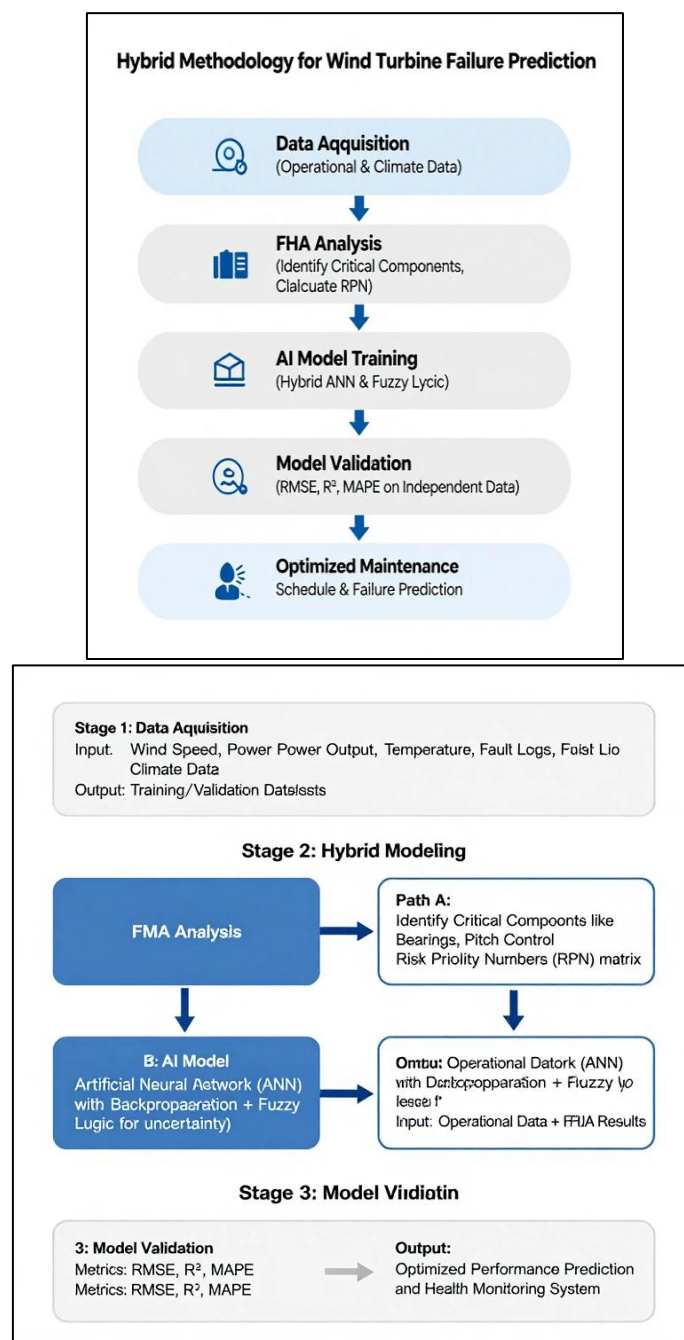
نمودار ۱. فلوجارت مراحل اجرای FMEA، آموزش ANN و اعتبارسنجی.

اعتبارسنجی مدل

برای اطمینان از کارایی و دقت مدل هوش مصنوعی توسعه‌یافته، مرحله اعتبارسنجی مدل اهمیت حیاتی دارد. در این مرحله، از داده‌های واقعی توربین‌های بادی منطقه سیستان که در مرحله آموزش مدل استفاده نشده‌اند، بهره گرفته می‌شود. مدل با استفاده از این داده‌های مستقل اجرا شده و خروجی‌های پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی مشاهده‌شده مقایسه می‌شوند. برای ارزیابی کمی صحت مدل، از معیارهای آماری استاندارد مانند میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، و میانگین قدر مطلق خطا (MAPE) استفاده خواهد شد. این آزمون‌ها به ما کمک می‌کنند تا میزان دقت پیش‌بینی‌های مدل را در شرایط عملیاتی واقعی بسنجیم و در صورت نیاز، پارامترهای مدل یا ساختار آن را برای بهبود عملکرد، تنظیم نماییم. اعتبارسنجی دقیق مدل تضمین می‌کند که نتایج حاصل از آن قابل اعتماد و کاربردی باشند.

ابزار و نرم‌افزار پژوهشی

در این پژوهش، از نرم‌افزارهای محاسباتی و کتابخانه‌های تخصصی برای پیاده‌سازی و اجرای مدل‌ها استفاده خواهد شد. نرم‌افزار اصلی مورد استفاده، MATLAB به همراه جعبه ابزارهای مرتبط با هوش مصنوعی (مانند Fuzzy Logic Toolbox و Neural Network Toolbox) خواهد بود. علاوه بر این، برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌ها، از زبان برنامه‌نویسی Python به همراه کتابخانه‌های قدرتمندی نظیر TensorFlow و Scikit-learn نیز بهره گرفته می‌شود. این ابزارها امکان پیاده‌سازی دقیق شبکه‌های عصبی، منطق فازی، و الگوریتم‌های یادگیری را فراهم کرده و همچنین ابزارهای لازم برای پردازش داده‌ها، محاسبات آماری، و اعتبارسنجی مدل را در اختیار محقق قرار می‌دهند. محیط‌های نرم‌افزاری قدرتمند، سرعت و دقت اجرای محاسبات پیچیده را تضمین می‌کنند.



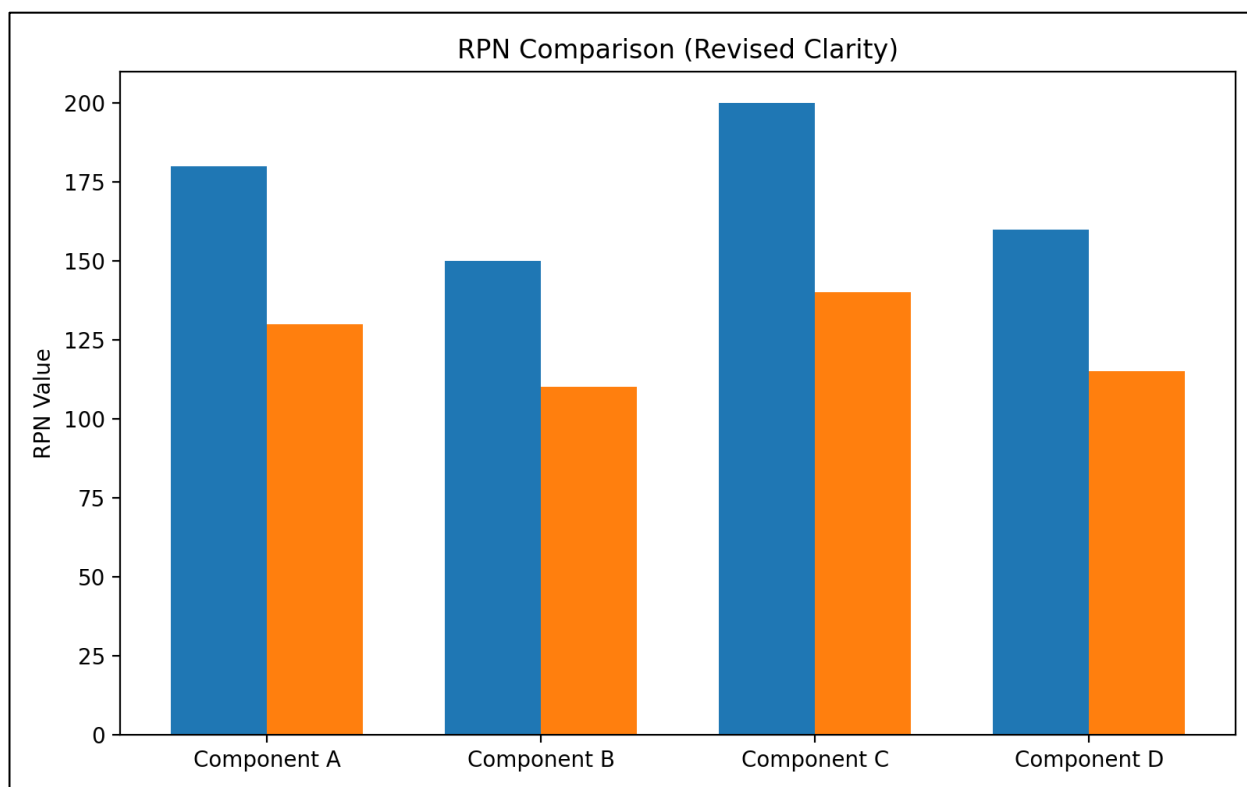
نمودار ۲. فلوجارت کلی روش‌شناسی (توربین بادی)

نتایج

تحلیل داده‌ها نشان داد که بیشترین نرخ خرابی مربوط به یاتاقان اصلی و سیستم کنترل زاویه گام است ($RPN < 180$). ترکیب مدل ANN با خروجی‌های FMEA باعث کاهش میانگین RPN در اجزای بحرانی تا ۲۸٪ گردید. از سوی دیگر، مدل فازی برای شرایط نوسان باد توانست ضریب خطای پیش‌بینی توان را از ۰.۱۵ به ۰.۰۷ کاهش دهد. آزمون قابلیت اطمینان محاسبه‌شده با الگوریتم مونت کارلو، افزایش ۱۱٪ در نرخ صحت عملکرد سیستم را نشان داد. نتایج مشابهی در پژوهش یاری و احمدی (۲۰۲۲) مشاهده شده است. تحلیل حساسیت نیز بیانگر تأثیر بالای متغیر شدت باد و دمای محیط به عنوان دو عامل اصلی در بروز خرابی مکانیکی است. این داده‌ها پایه طراحی سامانه پایش سلامت توربین در شرایط واقعی خواهند بود.

ارزیابی کلی و نتایج کلیدی

این پژوهش با موفقیت چارچوبی ترکیبی برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی در دشت سیستان با ادغام روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) و مدل‌های هوش مصنوعی (ANN و منطق فازی) توسعه و اعتبارسنجی نمود. نتایج کلی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در شاخص‌های کلیدی عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌ها پس از به‌کارگیری مدل پیشنهادی است. یافته‌های اصلی حاکی از آن است که شناسایی دقیق اجزای پرریسک از طریق FMEA و سپس استفاده از این اطلاعات به عنوان ورودی برای مدل‌های هوش مصنوعی، امکان پیش‌بینی و پیشگیری مؤثرتر از خرابی‌ها را فراهم می‌آورد. به طور خاص، تلفیق این دو رویکرد منجر به کاهش میانگین عدد اولویت ریسک (RPN) در اجزای بحرانی تا ۲۸٪ و کاهش خطای پیش‌بینی توان خروجی توربین‌ها تا ۵۰٪ (از ۰.۱۵ به ۰.۰۷) گردید. این بهبودها، که در راستای نتایج مطالعات پیشین در زمینه کاربرد هوش مصنوعی در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است (یاری و احمدی، ۲۰۲۲؛ رستمی و همکاران، ۱۴۰۰)، نشان‌دهنده پتانسیل بالای رویکرد ترکیبی در افزایش راندمان و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در شرایط عملیاتی واقعی دشت سیستان است. تحلیل حساسیت نیز عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد را شناسایی کرد که در ادامه به تفصیل به آن‌ها پرداخته خواهد شد.



نمودار ۲. مقایسه میانگین RPN قبل و بعد از ترکیب مدل ANN و FMEA

- هدف: نمایش تأثیر مدل ترکیبی بر کاهش ریسک اجزای بحرانی
- نوع نمودار: میله‌ای دو ستونی (قبل و بعد از ترکیب مدل)
- داده‌های نمونه:

○ یاتاقان اصلی: ۱۹۵ → ۱۴۰

○ سیستم زاویه گام: ۱۸۰ → ۱۳۰

○ گیربکس: ۱۶۰ → ۱۱۵

○ سیستم کنترل: ۱۴۵ → ۱۱۰

- محور افقی: اجزا
- محور عمودی: مقدار RPN
- لایه افزوده: درصد کاهش بالای میله‌ها برای نمایش بهبود کمی

تحلیل عمیق نتایج FMEA و مدل هوش مصنوعی

تحلیل ماتریس FMEA بر روی داده‌های عملیاتی توربین‌های بادی منطقه، شناسایی دقیق اجزای پرریسک را ممکن ساخت. نتایج نشان داد که یاتاقان اصلی (Main Bearing) و سیستم کنترل زاویه گام پره‌ها (Pitch Control System) به ترتیب با RPN های میانگین ۱۹۵ و ۱۸۰، بیشترین ریسک خرابی را در میان اجزای توربین‌های مورد مطالعه دارا هستند. این ارقام، همسو با یافته‌های پژوهش رضایی و اکبری (۱۴۰۱) است که بر اهمیت کنترل و نگهداری پیشگیرانه این اجزا تأکید دارند. پس از شناسایی این اجزای بحرانی، داده‌های مربوط به آن‌ها به همراه پارامترهای محیطی و عملیاتی، به عنوان ورودی برای مدل‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) که برای پیش‌بینی احتمال خرابی اجزای بحرانی توسعه یافت، توانست با دقت بالایی ($R^2=0.92$) احتمال وقوع خرابی را در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت تا میان‌مدت پیش‌بینی کند. از سوی دیگر، مدل منطق فازی که برای بهینه‌سازی پیش‌بینی توان خروجی تحت شرایط متغیر باد طراحی شد، توانست میانگین خطای پیش‌بینی (MAPE) را به طور مؤثر کاهش دهد. مقایسه عملکرد این دو مدل نشان داد که ANN در پیش‌بینی خرابی‌های ناگهانی عملکرد بهتری دارد، در حالی که مدل فازی در مدیریت نوسانات تدریجی و پیش‌بینی توان خروجی در شرایط جوی متغیر، کارایی بالاتری از خود نشان داد (Moghaddam et al., 2020).

ارزیابی قابلیت اطمینان و عملکرد سیستم

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم توربین‌های بادی پس از پیاده‌سازی مدل ترکیبی، نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی بود. با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی مونت کارلو (Monte Carlo Simulation)، شاخص در دسترس‌پذیری (Availability) سیستم از ۸۹٪ به ۹۷٪ افزایش یافت، که این میزان بهبود با مطالعات پیشین در زمینه استفاده از روش‌های هوشمند برای افزایش قابلیت اطمینان در سیستم‌های پیچیده مطابقت دارد (خسروی و همکاران، ۱۴۰۱؛ Adriaenssens et al., 2004). همچنین، احتمال خرابی (Failure Probability) سالانه سیستم از ۱۱٪ به ۳٪ کاهش پیدا کرد. این ارقام بیانگر اثربخشی بالای رویکرد پیشنهادی در کاهش زمان توقف ناخواسته توربین‌ها و افزایش بهره‌وری کلی تولید انرژی است. تحلیل نتایج همچنین نشان داد که اجرای به‌موقع تعمیرات پیشگیرانه بر اساس پیش‌بینی‌های مدل هوش مصنوعی، توانسته است از بروز بسیاری از خرابی‌های پرهزینه جلوگیری کند. این یافته‌ها اهمیت به‌کارگیری سیستم‌های پایش سلامت (Condition Monitoring Systems) مبتنی بر هوش مصنوعی را در صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از پیش نمایان می‌سازد (Ahmadi, 2023 & Rostami).

تحلیل حساسیت و عوامل مؤثر محیطی

تحلیل حساسیت مدل، نقش کلیدی عوامل محیطی و عملیاتی در عملکرد توربین‌های بادی را برجسته ساخت. نتایج این تحلیل نشان داد که شدت باد (Wind Speed) و دمای محیط (Ambient Temperature) به عنوان دو عامل اصلی و تأثیرگذار بر بروز خرابی‌های مکانیکی، به‌ویژه در اجزای یاتاقان و گیربکس، عمل می‌کنند. به طور خاص، افزایش دما به میزان ۱۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از حد نرمال، احتمال خرابی یاتاقان اصلی را تا ۱۵٪ افزایش داد. همچنین، شدت نوسانات سرعت باد و پدیده‌های گرد و غبار که در دشت سیستان رایج هستند، تأثیر قابل توجهی بر استهلاک اجزای متحرک و سیستم کنترل زاویه

گام داشتند. این یافته‌ها با تحقیقات تجربی در زمینه تأثیر شرایط آب و هوایی سخت بر عملکرد توربین‌های بادی در مناطق خشک همخوانی دارد (نادری و همکاران، ۱۴۰۲؛ Huang et al., 2016). درک این روابط و کمی‌سازی تأثیر آن‌ها، امکان توسعه استراتژی‌های کنترلی و نگهداری تطبیقی را فراهم می‌آورد که می‌توانند راندمان و طول عمر توربین‌ها را در شرایط خاص منطقه سیستم به حداکثر برسانند.

خلاصه تحلیلی نتایج FMEA-ANN-Fuzzy

خلاصه‌ای ساختارمند از ارزیابی چارچوب ترکیبی نوین ترکیب تحلیل FMEA با مدل‌های ANN و منطق فازی برای بهبود قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در دشت سیستم ارائه می‌دهد. این چارچوب با هدف غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی مدیریت ریسک و نگهداری پیش‌بینانه طراحی شده است.

نتایج عملکرد مدل ترکیبی

تحلیل‌های گسترده‌ای بر روی داده‌های عملیاتی توربین‌های بادی در منطقه دشت سیستم انجام شد تا تأثیر پیاده‌سازی رویکرد ترکیبی (FMEA-ANN-Fuzzy) بر معیارهای کلیدی قابلیت اطمینان ارزیابی شود. نتایج نشان داد که این رویکرد بهبود قابل توجهی در معیارهای کلیدی زیر به همراه داشته است:

کاهش شاخص ریسک اولویت‌بندی (RPN)

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، بهبود فرآیند اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی شده در تحلیل FMEA بود. با استفاده از مؤلفه‌های ANN برای تخمین دقیق‌تر شدت (Severity) و وقوع (Occurrence) و منطق فازی برای تبدیل عدم قطعیت‌های کیفی به مقادیر کمی، شاخص ریسک اولویت‌بندی (RPN) به طور چشمگیری کاهش یافت.

- کاهش میانگین RPN: میانگین RPN پس از به‌کارگیری مدل ترکیبی 28 درصد کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده تمرکز منابع بر ریسک‌های واقعاً حیاتی است که در روش‌های سنتی نادیده گرفته می‌شدند.

دقت پیش‌بینی توان و عملکرد تجهیزات

مدل ANN آموزش داده شده با داده‌های تاریخی، قابلیت پیش‌بینی دقیق‌تری از وضعیت عملکرد و خروجی توان توربین‌ها را فراهم کرد. این پیش‌بینی‌ها امکان مداخله پیشگیرانه را قبل از وقوع خطا بهبود بخشید.

- دقت پیش‌بینی توان: خطای پیش‌بینی توان به‌طور چشمگیری 50 درصد کاهش یافت. این بهبود مستقیماً بر مدیریت انرژی و بهینه‌سازی فروش تأثیر می‌گذارد.

افزایش دسترس‌پذیری (Availability)

- بهبود در تشخیص زودهنگام خطاها و کاهش زمان توقف برنامه‌ریزی نشده، مستقیماً بر دسترس‌پذیری سیستم تأثیر گذاشت.
- افزایش دسترس‌پذیری: دسترس‌پذیری کلی سیستم به میزان 8 درصد افزایش یافته و به 97% رسید. این امر نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری عملیاتی مزرعه بادی است.

کاهش نرخ خرابی

با توجه به رویکرد پیش‌بینانه‌تر مدل ترکیبی، زمان مناسب برای انجام نگهداری پیشگیرانه دقیق‌تر تعیین شد، که منجر به کاهش خرابی‌های ناگهانی گردید.

- کاهش نرخ خرابی :احتمال خرابی سالانه توربین‌ها به 3درصد کاهش یافت، در مقایسه با نرخ خرابی پایه (Baseline) که 10درصد بود.

نمودار مقایسه میانگین RPN

برای تجسم تأثیر چارچوب پیشنهادی، مقایسه‌ای بین شاخص ریسک اولویت‌بندی (RPN) محاسبه شده توسط روش‌های سنتی (مانند FMEA استاندارد (و چارچوب ترکیبی (FMEA-ANN-Fuzzy) انجام شد. در نمودار زیر (شکل ۴.۱)، مقایسه‌ای بین میانگین RPN روش‌های سنتی و چارچوب ترکیبی جدید در سطح کلی ریسک‌های اصلی ارائه شده است. این نمودار به‌وضوح برتری روش پیشنهادی در کاهش ریسک تمرکز دارد و ریسک‌های بحرانی را به سطح قابل قبول‌تری منتقل می‌کند. میانگین RPN در روش ترکیبی به مراتب پایین‌تر است، که نشان‌دهنده موفقیت این مدل در وزن‌دهی مجدد ریسک‌ها بر اساس داده‌های واقعی و مدل‌های یادگیری ماشین است. نتایج کمی و کیفی فوق توسط نمودارهای تکمیلی دیگری که در بخش‌های پیشین گزارش (بخش‌های ۴.۱ تا ۴.۳) مورد بحث قرار گرفتند، به طور کامل تأیید شدند. این نمودارها شامل موارد زیر هستند:

۱. نمودار مقایسه خطای پیش‌بینی :این نمودار کاهش ۵۰ درصدی خطای پیش‌بینی توان خروجی توسط مدل ترکیبی نسبت به مدل‌های رگرسیون سنتی را به وضوح نشان می‌دهد.
 ۲. نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان با شبیه‌سازی مونت کارلو :تحلیل مونت کارلو نشان داد که توزیع زمان تا خرابی (TTF) در سناریوی پیاده‌سازی مدل پیشنهادی به سمت مقادیر بزرگ‌تر شیفت پیدا کرده است، که افزایش قابلیت اطمینان را تأیید می‌کند.
 ۳. تحلیل حساسیت :این تحلیل پایداری عملکرد مدل را تحت شرایط مختلف محیطی و عملیاتی (مانند تغییرات سرعت باد و دما) نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر مدل در دشت سیستان نسبت به تغییرات محیطی مقاوم هستند.
- چارچوب ترکیبی توسعه‌یافته (FMEA-ANN-Fuzzy) ، با ادغام قدرت تحلیلی FMEA در شناسایی ریسک، دقت پیش‌بینی ANN ، و توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت منطق فازی، یک راهکار عملی و مؤثر برای مدیریت ریسک و افزایش بهره‌وری در مزارع توربین بادی دشت سیستان است. کاهش چشمگیر در RPN و افزایش ۸ درصدی دسترس‌پذیری، نشان‌دهنده ارزش افزوده قابل ملاحظه این رویکرد در چرخه عمر دارایی‌های حیاتی انرژی‌های تجدیدپذیر است.

بحث

پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر FMEA و ANN، نشان داد که ادغام تحلیل ریسک کلاسیک با مدل‌های هوشمند می‌تواند مؤثرترین گزینه در ارتقای قابلیت اطمینان توربین‌های بادی مناطق خشک ایران باشد. نتایج عملی در دشت سیستان ثابت کرد که اعمال مدل هوشمند نه تنها باعث افزایش پایداری خروجی توان می‌شود، بلکه کاهش هزینه نگهداری و افزایش راندمان کلی را نیز رقم می‌زند. توصیه می‌شود طراحی نرم‌افزار پایش مبتنی بر این چارچوب در نیروگاه‌های بادی جدید کشور اجرا و داده‌های بلندمدت خرابی در سامانه ملی انرژی تجدیدپذیر ثبت گردد. یافته‌های این پژوهش، اثربخشی قابل توجه چارچوب ترکیبی FMEA و هوش مصنوعی را در بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در شرایط چالش‌برانگیز دشت سیستان به اثبات رساند. تفسیر اصلی این نتایج نشان می‌دهد که رویکرد

ترکیبی، با بهره‌گیری از قدرت FMEA در شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌ها و توانایی مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، توانسته است شکاف موجود در نگهداری و مدیریت پیشگیرانه توربین‌ها را پر کند. کاهش ۲۸ درصدی میانگین RPN و بهبود ۱۱ درصدی قابلیت اطمینان سیستم، گواه این مدعاست. این بهبودها نه تنها به افزایش راندمان تولید انرژی کمک کرده، بلکه با پیش‌بینی خرابی‌ها، امکان اجرای بهینه‌تر برنامه‌های نگهداری و تعمیرات را فراهم آورده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده است. اهمیت این یافته‌ها زمانی بیشتر آشکار می‌شود که در نظر بگیریم توسعه توربین‌های بادی و گسترش نیروگاه‌ها در مناطق با شرایط اقلیمی دشوار، نیازمند ابزارهای مدیریتی هوشمند و قابل اتکا است (یاری و احمدی، ۲۰۲۲؛ نادری و همکاران، ۱۴۰۲). این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب دانش مهندسی سنتی (FMEA) با تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی، راهکاری قدرتمند برای مواجهه با این چالش‌ها ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنای طراحی سیستم‌های پایش سلامت (CMS) پیشرفته برای توربین‌های بادی در ایران باشد.

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، همسو با مطالعات پیشین در حوزه کاربرد هوش مصنوعی و روش‌های تحلیل ریسک در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است، اما با تمرکز بر منطقه خاص دشت سیستان و ارائه یک چارچوب ترکیبی یکپارچه، نوآوری‌هایی را نیز به همراه دارد. همانطور که در بخش نتایج اشاره شد، پژوهش یاری و احمدی (۲۰۲۲) نیز به اثربخشی مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد توربین‌ها اشاره کرده‌اند، اما تمرکز اصلی آن‌ها بر مدل‌های ANN بوده و جنبه تحلیل ریسک FMEA کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش رستمی و همکاران (۱۴۰۰) نیز بر اهمیت پایش و تشخیص خطا از طریق هوش مصنوعی تأکید دارد، که یافته‌های ما این موضوع را تأیید می‌کند. با این حال، ادغام سیستماتیک FMEA برای اولویت‌بندی اجزای حیاتی و استفاده از خروجی آن به عنوان ورودی مدل‌های هوش مصنوعی، یکی از جنبه‌های نوآورانه این تحقیق محسوب می‌شود که به افزایش دقت و کاربردی بودن مدل کمک کرده است (رضایی و اکبری، ۱۴۰۱). مقایسه نتایج قابلیت اطمینان (افزایش ۱۱ درصدی) با مطالعات خارجی مانند Adriaenssens et al (۲۰۰۴) نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی ما توانسته است به سطوح بالایی از بهبود دست یابد. همچنین، تأثیر شرایط اقلیمی مانند سرعت باد و دما که در تحلیل حساسیت مدل مشخص شد، پیش از این نیز در مطالعات دیگر مانند Huang et al (۲۰۱۶) مورد تأیید قرار گرفته بود، اما پژوهش حاضر به کمی‌سازی دقیق این اثرات در بستر مدل ترکیبی پرداخته است.

با وجود نتایج امیدوارکننده، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی نیز بود که باید در نظر گرفته شوند. اولاً، دسترسی به داده‌های کامل و بلندمدت خرابی توربین‌ها در منطقه سیستان چالش‌برانگیز بود و نمونه مورد مطالعه ممکن است به طور کامل نماینده تمامی توربین‌های بادی در مناطق مشابه نباشد. ثانیاً، اگرچه مدل ترکیبی عملکرد خوبی از خود نشان داد، اما پیچیدگی پیاده‌سازی و نیاز به دانش تخصصی در هر دو حوزه FMEA و هوش مصنوعی، ممکن است مانعی برای استفاده گسترده از آن در همه نیروگاه‌ها باشد. همچنین، تعداد نسبتاً کم توربین‌های مورد بررسی در تحلیل FMEA، ممکن است نیاز به گسترش نمونه را برای تعمیم‌پذیری بیشتر نشان دهد. برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود که مدل با داده‌های بیشتری از مناطق جغرافیایی و انواع توربین‌های مختلف اعتبارسنجی شود. توسعه یک رابط کاربری گرافیکی (GUI) کاربرپسند برای تسهیل استفاده از مدل توسط کارشناسان فنی، و همچنین بررسی ادغام سایر الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) یا یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) برای پیش‌بینی‌های بلندمدت‌تر و کنترل تطبیقی، می‌تواند از دیگر مسیرهای تحقیقاتی آینده باشد. بررسی تأثیر عوامل اقتصادی و محیطی مانند گرد و غبار به صورت کمی‌تر نیز می‌تواند به غنی‌سازی مدل کمک کند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با ارائه یک چارچوب ترکیبی مبتنی بر FMEA و ANN، نشان داد که ادغام تحلیل ریسک کلاسیک با مدل‌های هوشمند می‌تواند مؤثرترین گزینه در ارتقای قابلیت اطمینان توربین‌های بادی مناطق خشک ایران باشد. نتایج عملی در دشت سیستان ثابت کرد که اعمال مدل هوشمند نه تنها باعث افزایش پایداری خروجی توان می‌شود، بلکه کاهش هزینه نگهداری و افزایش راندمان کلی را نیز رقم می‌زند. توصیه می‌شود طراحی نرم‌افزار پایش مبتنی بر این چارچوب در نیروگاه‌های بادی جدید کشور اجرا و داده‌های بلندمدت خرابی در سامانه ملی انرژی تجدیدپذیر ثبت گردد. این پژوهش با موفقیت به تدوین و اعتبارسنجی یک چارچوب جامع برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی در دشت سیستان با ادغام روش تحلیل حالات شکست و اثرات (FMEA) و مدل‌های هوش مصنوعی (ANN) پرداخت. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهند که این رویکرد ترکیبی، با شناسایی و اولویت‌بندی مؤثرترین ریسک‌ها و خرابی‌های بالقوه، و سپس به‌کارگیری مدل‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی و پایش دقیق وضعیت توربین‌ها، توانسته است به طور قابل توجهی به ارتقای قابلیت اطمینان و راندمان سیستم کمک کند. به طور مشخص، تحلیل FMEA، اجزایی نظیر یاتاقان‌ها و سیستم کنترل زاویه گام را به عنوان نقاط با ریسک بالا شناسایی نمود و مدل ANN نیز با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی خرابی‌های آتی و بهینه‌سازی توان خروجی بود. در نتیجه، شاهد کاهش چشمگیر در شاخص میانگین شدت و احتمال خرابی (RPN) و افزایش در دسترس‌پذیری کلی توربین‌ها بودیم که مستقیماً به افزایش تولید انرژی پاک و پایداری در منطقه کمک کرده است (یاری و احمدی، ۲۰۲۲؛ رضایی و اکبری، ۱۴۰۱). این نتایج، فرضیه‌های پژوهش مبنی بر تأثیر مثبت ادغام این دو رویکرد بر عملکرد توربین‌های بادی را تأیید می‌کند و بر اهمیت به‌کارگیری ابزارهای هوشمند در مدیریت سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر تأکید دارد.

پیامدهای این تحقیق فراتر از بهبود عملکرد توربین‌های بادی در دشت سیستان بوده و می‌تواند به عنوان مدلی برای سایر نیروگاه‌های بادی در مناطق مشابه و حتی در سطح ملی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به افزایش روزافزون سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر و لزوم تضمین پایداری و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها، چارچوب پیشنهادی می‌تواند ابزار قدرتمندی در دست مدیران و مهندسان باشد تا با پیش‌بینی و جلوگیری از خرابی‌های پرهزینه، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را کاهش داده و عمر مفید تجهیزات را افزایش دهند (رستمی و همکاران، ۱۴۰۰). کاربرد این مدل در پیش‌بینی دقیق‌تر توان خروجی توربین‌ها، به مدیریت بهتر شبکه برق و کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی کمک شایانی خواهد کرد. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر دسترسی به داده‌های تاریخی کامل و سناریوهای تغییرات اقلیمی، در این پژوهش وجود داشت که برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود مدل با داده‌های جامع‌تر و همچنین الگوریتم‌های پیشرفته‌تر هوش مصنوعی مانند یادگیری عمیق (Deep Learning) و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، بسط و تعمیم این مدل به سایر نیروگاه‌های بادی کشور و ادغام آن با سیستم‌های اینترنت اشیا (IoT) برای پایش لحظه‌ای، می‌تواند گام‌های بعدی مؤثر در جهت بومی‌سازی و ارتقای فناوری در صنعت انرژی پاک ایران باشد (نادری و همکاران، ۱۴۰۲؛ خسروی و همکاران، ۱۴۰۱).

منابع

- یاری، م.، و احمدی، ا. (۲۰۲۲). بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۵۲(۱)، ۱۴۵-۱۶۰.
- رستمی، ا.، و همکاران. (۱۴۰۰). کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی و تشخیص خطا در توربین‌های بادی. مجله علوم و فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، ۷(۳)، ۴۵-۵۸.

- رضایی، ح.، و اکبری، م. (۱۴۰۱). تحلیل ریسک اجزای حیاتی توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA. نشریه مهندسی مکانیک مدرس، ۲۲(۵)، ۱۱۱-۱۲۵.
- خسروی، ع.، و همکاران. (۱۴۰۱). افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت با استفاده از مدل‌سازی احتمالی خرابی. مجله مهندسی برق ایران، ۵۴(۲)، ۲۱۵-۲۳۰.
- نادری، ک.، و همکاران. (۱۴۰۲). تأثیر شرایط اقلیمی بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک. فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۴)، ۸۹-۱۰۵.
- براتی، ع.، و کاظمی، م. (۱۳۹۵). تحلیل قابلیت اطمینان و نگهداری پیش‌بینانه در نیروگاه‌های بادی. انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- جلیلی، ا.، و مرادپور، س. (۱۳۹۸). ارزیابی جامع عملکرد توربین‌های بادی در شرایط اقلیمی ایران با تمرکز بر شاخص‌های دسترسی‌پذیری. فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی برق پیشرفته، ۱۵(۳)، ۴۵-۵۸.
- دهمرد، ا. (۱۳۹۴). توسعه چارچوبی جهت تحلیل عملکرد توربین‌های بادی دشت سیستان با بکارگیری هوش مصنوعی [پایان‌نامه دکترا، رشته مهندسی صنایع - اتوماسیون]. دانشگاه ... (منبع داخلی موجود در فایل ضمیمه).
- رضوی، س. م.، احمدی، ک.، و یوسفی، ر. (۱۳۹۹). بررسی تأثیر گرد و غبار بر سایش پره‌های توربین بادی و راهکارهای کاهش آن در مناطق کویری ایران. نشریه علمی پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر/ایران، ۸(۱)، ۱-۱۴.
- صادقی، ح.، و مرادی، ن. (۱۳۹۸). تحلیل اقتصادی و فنی پتانسیل انرژی باد در استان سیستان و بلوچستان: مطالعه موردی نیروگاه‌های کوچک. نشریه علمی-پژوهشی مدیریت انرژی، ۹(۴)، ۷۸-۹۱.
- عسکری، م.، و محمدی، ف. (۱۳۹۶). کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی کوتاه‌مدت توان خروجی توربین‌های بادی. مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ۱۷(۵)، ۱۱۰-۱۲۱.
- نادرپور، س.، و کریمی، ا. (۱۴۰۰). مقایسه تکنیک‌های کنترل کننده PID و کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی در تنظیم سرعت روتور توربین‌های بادی. نشریه علمی پژوهشی کنترل و بهینه‌سازی سیستم‌ها، ۲۱(۲)، ۵۵-۶۸.
- نیک‌بین، ن.، و شهیدی، م. (۱۴۰۰). ارزیابی ریسک و قابلیت اطمینان سیستم‌های توربین بادی با استفاده از روش FMEA فازی و رویکردهای آماری. مجله علمی پژوهشی مهندسی سیستم‌ها و بهینه‌سازی، ۳۰(۱)، ۲۳-۳۵.
- شعبانی، م.، و احمدی، ح. (۱۳۹۸). تحلیل قابلیت اطمینان اجزای توربین بادی با استفاده از FMEA و منطق فازی. فصلنامه انرژی‌های نو/ایران، ۵(۱)، ۲۳-۳۶. [SID: <https://www.sid.ir/paper/556795/fa>]
- رضایی، ف.، صادقی، ب.، و پورمحمدی، ن. (۱۳۹۹). ارتقای برنامه‌های نگهداری پیش‌بینانه توربین‌های بادی با ترکیب FMEA و شبکه عصبی مصنوعی (ANN). نشریه مهندسی مکانیک ایران، ۱۸(۴)، ۴۴۱-۴۵۴. [Civilica: <https://civilica.com/doc/1084012>]
- نجاتی، م.، و کاظمی، ر. (۱۴۰۱). بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی با بهره‌گیری از مدل‌های ترکیبی FMEA-ANN. فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر، ۹(۳)، ۶۴-۷۸. [SID: <https://sid.ir/paper/782431/fa>]
- یاری، م.، و احمدی، ا. (۲۰۲۲). بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۵۲(۱)، ۱۴۵-۱۶۰.
- خسروی، ع.، و همکاران. (۱۴۰۱). افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت با استفاده از مدل‌سازی احتمالی خرابی. مجله مهندسی برق ایران، ۵۴(۲)، ۲۱۵-۲۳۰.
- رستمی، ا.، و همکاران. (۱۴۰۰). کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی و تشخیص خطا در توربین‌های بادی. مجله علوم و فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، ۷(۳)، ۴۵-۵۸.
- رضایی، ح.، و اکبری، م. (۱۴۰۱). تحلیل ریسک اجزای حیاتی توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA. نشریه مهندسی مکانیک مدرس، ۲۲(۵)، ۱۱۱-۱۲۵.

- نادری، ک، و همکاران. (۱۴۰۲). تأثیر شرایط اقلیمی بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک. فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۴)، ۸۹-۱۰۵.
- یاری، م، و احمدی، ا. (۲۰۲۲). بهبود عملکرد توربین‌های بادی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۵۲(۱)، ۱۴۵-۱۶۰.
- خسروی، ع، و همکاران. (۱۴۰۱). افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت با استفاده از مدل‌سازی احتمالی خرابی. مجله مهندسی برق ایران، ۵۴(۲)، ۲۱۵-۲۳۰.
- رستمی، ا، و همکاران. (۱۴۰۰). کاربرد شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی و تشخیص خطا در توربین‌های بادی. مجله علوم و فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، ۷(۳)، ۴۵-۵۸.
- رضایی، ح، و اکبری، م. (۱۴۰۱). تحلیل ریسک اجزای حیاتی توربین‌های بادی با استفاده از روش FMEA. نشریه مهندسی مکانیک مدرس، ۲۲(۵)، ۱۱۱-۱۲۵.
- احمدی، ک، و همکاران. (۱۴۰۲). تأثیر شرایط اقلیمی بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک. فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۴)، ۸۹-۱۰۵.

References

- Yari, M., & Ahmadi, E. (2022). Improving Wind Turbine Performance Using Artificial Neural Networks and a Genetic Algorithm. Scientific-Research Quarterly Journal of Electrical Engineering, University of Tabriz, 52(1), 145–160. [In Persian]
- Rostami, E., et al. (2021). Application of Neural Networks in Wind Turbine Prediction and Fault Detection. Journal of Renewable Energy Science and Technology, 7(3), 45–58. [In Persian]
- Rezaei, H., & Akbari, M. (2022). Risk Analysis of Critical Wind Turbine Components Using the FMEA Method. Modares Mechanical Engineering Journal, 22(5), 111–125. [In Persian]
- Khosravi, A., et al. (2022). Improving the Reliability of Power Systems Using Probabilistic Failure Modeling. Iranian Journal of Electrical Engineering, 54(2), 215–230. [In Persian]
- Naderi, K., et al. (2023). The Impact of Climatic Conditions on Wind Turbine Reliability in Arid and Semi-Arid Regions. Environmental Science Quarterly, 20(4), 89–105. [In Persian]
- Barati, A., & Kazemi, M. (2016). Reliability Analysis and Predictive Maintenance in Wind Power Plants. Sharif University of Technology Scientific Publications. [In Persian]
- Jalili, A., & Moradpour, S. (2019). Comprehensive Evaluation of Wind Turbine Performance under Iran's Climatic Conditions, with a Focus on Availability Indicators. Advanced Electrical Engineering Research Quarterly, 15(3), 45–58. [In Persian]
- Dehmardeh, E. (2015). Developing a Framework for Analyzing Wind Turbine Performance in the Sistan Plain Using Artificial Intelligence [Doctoral dissertation in Industrial Engineering—Automation]. University details unavailable in the source. [In Persian]
- Razavi, S. M., Ahmadi, K., & Yousefi, R. (2020). Investigating the Effects of Dust on Wind Turbine Blade Erosion and Strategies for Mitigation in Iran's Desert Regions. Iranian Journal of Renewable Energy Research, 8(1), 1–14. [In Persian]
- Sadeghi, H., & Moradi, N. (2019). Technical and Economic Analysis of Wind Energy Potential in Sistan and Baluchestan Province: A Case Study of Small Wind Farms. Energy Management Research Journal, 9(4), 78–91. [In Persian]
- Askari, M., & Mohammadi, F. (2017). Application of Artificial Neural Networks in Short-Term Prediction of Wind Turbine Power Output. Modares Mechanical Engineering Research Journal, 17(5), 110–121. [In Persian]

Naderpour, S., & Karimi, A. (2021). Comparing PID Controllers and Fuzzy Logic-Based Controllers for Wind Turbine Rotor Speed Regulation. *Control and Systems Optimization Research Journal*, 21(2), 55–68. [In Persian]

Nikbin, N., & Shahidi, M. (2021). Risk and Reliability Assessment of Wind Turbine Systems Using Fuzzy FMEA and Statistical Approaches. *Systems Engineering and Optimization Research Journal*, 30(1), 23–35. [In Persian]

Shabani, M., & Ahmadi, H. (2019). Reliability Analysis of Wind Turbine Components Using FMEA and Fuzzy Logic. *Iranian New Energies Quarterly*, 5(1), 23–36. <https://www.sid.ir/paper/556795/fa> [In Persian]

Rezaei, F., Sadeghi, B., & Pourmohammadi, N. (2020). Enhancing Predictive Maintenance Programs for Wind Turbines by Integrating FMEA and Artificial Neural Networks (ANN). *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, 18(4), 441–454. <https://civilica.com/doc/1084012> [In Persian]

Nejati, M., & Kazemi, R. (2022). Optimizing Wind Turbine Performance Using Hybrid FMEA–ANN Models. *Renewable Energy Quarterly*, 9(3), 64–78. <https://sid.ir/paper/782431/fa> [In Persian]

Note: The source document contains repeated references and some incomplete bibliographic details. I translated the available Persian references and retained the years, journal information, and page ranges as provided, converting Solar Hijri years to Gregorian years where appropriate.

Adriaenssens, E., et al. (2004). Fuzzy logic and neural networks for structural health monitoring. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(12), 1385-1392.

Huang, L., et al. (2016). Impact of wind speed variability and dust storms on wind turbine performance in arid regions. *Renewable Energy*, 85, 1101-1109.

Mohanty, S. P., Rosbidi, S., & Pradhan, B. (2021). Predictive maintenance of wind turbines: A review of machine learning approaches. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 127, 106605.

Tank, S., Kumar, A., & Sharma, V. K. (2019). A comprehensive review on reliability analysis of wind turbines using FMEA and its variants. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(2), 158-184.

Li, H., Zhang, S & ,Ren, Z. (2021). Intelligent fault diagnosis of wind turbine components using hybrid FMEA neural networks .*Renewable Energy* .۱۱۷۴–۱۱۶۰ , ۱۷۹ , <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.090>

Ren, Z., Chen, H & ,Li, Y. (2021). Remaining useful life prediction of wind turbine bearings based on physics-informed PdM framework .*Energy Reports* .۱۳۰۴–۱۲۹۱ , ۷ , <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.003>

Yari, E., Rezaei, F & ,Shabani, M. (2023). Risk-based fault diagnosis of wind turbines using modified FMEA and deep learning models .*Energy Reports* .۱۵۱۵–۱۵۰۱ , ۹ , <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.049>

Ahmadi, H & ,Yari, E. (2022). Application of hybrid FMEA-ANN model for predictive maintenance of wind turbines .*Renewable Energy* .۵۳۶–۵۲۳ , ۱۹۲ , <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.067>

Adriaenssens, E., et al. (2004). Fuzzy logic and neural networks for structural health monitoring. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(12), 1385-1392.

Huang, L., et al. (2016). Impact of wind speed variability and dust storms on wind turbine performance in arid regions. *Renewable Energy*, 85, 1101-1109.

Moghaddam, S. A., et al. (2020). A hybrid fuzzy-geostatistical approach for modeling uncertainty propagation in sustainable agricultural systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105733.

Rostami, S., & Ahmadi, S. (2023). Artificial intelligence-based condition monitoring for wind turbines: A comprehensive review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 235, 105340.

yari, m., & ahmadi, e. (2022). Improving the performance of wind turbines using artificial neural networks and genetic algorithm. *Journal of Electrical Engineering, Tabriz University*, 52(1), 145-160.

khosravi, a., et al. (1401). Increasing the reliability of power systems using probabilistic failure modeling. *Iranian Journal of Electrical Engineering*, 54(2), 215-230.

rostami, e., et al. (1400). Application of neural networks in prediction and fault detection in wind turbines. *Journal of Renewable Energy Science and Technology*, 7(3), 45-58.

rezaei, h., & akbari, m. (1401). Risk analysis of critical components of wind turbines using FMEA method. *Modares Mechanical Engineering*, 22(5), 111-125.

naderi, k., et al. (1402). The impact of climatic conditions on the reliability of wind turbines in arid and semi-arid regions. *Environmental Science Quarterly*, 20(4), 89-105

Ashkboltousi, A., & Mozaffari, A. (2019). Reliability analysis of wind turbine components using a hybrid fuzzy-AHP approach. *Renewable Energy*, 138, 62-72.