



ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم توربین بادی به روش مدل‌سازی بلوک‌دیاگرام

امیر علی سیف‌الدین اصل^۱، احمد فدایی^۲، کسری قنبری^۲، ستار زواری^{۳*}

۱- استادیار، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، sattar.zavvari@ut.ac.ir

چکیده

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های انرژی تجدیدپذیرگامی اساسی در بررسی امکان‌پذیری و توجیه‌پذیری پروژه‌های برق تجدیدپذیر می‌باشد که می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در ارتباط با دسترس‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم‌ها، استراتژی‌های تعمیرات و نگهداری و هزینه‌های عملیاتی در اختیار قرار دهد. در این راستا، پژوهش حاضر با رویکردی آماری/ شبیه‌سازی به تحلیل پارامترهای قابلیت اطمینان در سیستم توربین بادی می‌پردازد. به این منظور از مدل بلوک‌دیاگرام قابلیت اطمینان برای مدل‌سازی مسئله بهره گرفته شد که توانمندی بالایی در تحلیل سیستم‌های پیچیده و با تعداد اجزای بالا را در عین سادگی و شفافیت داراست. مدل‌سازی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار رم‌کامندر صورت گرفته است. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شبکه‌ی متوالی از زیر سیستم‌ها و اجزاء (۸ زیرسیستم و ۹۴ جزء) و لحاظ کردن توزیع‌های احتمال زمان خرابی، زمان تعمیر و سایر داده‌های قابلیت اطمینان برای بلوک‌ها صورت پذیرفت و در انتها نتایج با به‌کارگیری الگوریتم مونت کارلو استخراج گردید. مقدار میانگین دسترس‌پذیری یک توربین در دوره‌ی ۲۰ ساله‌ی عمر، بیش از ۰.۹۹۹ محاسبه شد. در ۲۵ نقطه‌ی زمانی توربین نیازمند تعمیرات می‌باشد و زمان میانگین بین خرابی‌ها برابر ۷۰۰۸ ساعت محاسبه شد. زمان میانگین بین خرابی‌های بحرانی سیستم (خرابی فاجعه‌آمیز) ۷۷۹۲۸ ساعت است.

کلمات کلیدی: ارزیابی قابلیت اطمینان، توربین بادی، مدل بلوک‌دیاگرام، نرم‌افزار رم‌کامندر، انرژی‌های تجدیدپذیر

Assessment of Wind Turbine Reliability Using Block Diagram Model

AmirAli Saifoddin Asl¹, Ahmad Fadaei², Kasra Ghanbari², Sattar Zavvari^{3*}

1- Assistant Professor, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Master's student, Department of Renewable Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran

3- PhD student, Department of Renewable Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, sattar.zavvari@ut.ac.ir

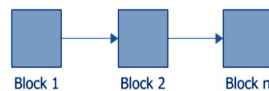
Received: 28 August 2020 Accepted: 17 May 2021

Abstract

Reliability assessment of renewable energy systems is a key step in evaluating the feasibility of renewable energy projects. The assessment can provide valuable information on the availability and reliability, operation and maintenance strategies, and operating costs of systems. In this regard, the present study analyzes the reliability parameters of a wind turbine system using a statistical / simulation approach. To this end, the Reliability block diagram has been used for modeling the problem which has the capability of analyzing complex systems with a high number of components while providing simplicity and transparency in the concept presentation. For the modeling and simulation, RAM Commander software developed by ALD software company was utilized. The block diagram model was developed considering a series arrangement (8 subsystems and 94 components) and taking into account the probability distributions of failure time, repair time, and other reliability data for each block. results were then obtained by implementing the Monte Carlo algorithm. The results of this study contain the values of reliability, availability, and failure rate for a turbine during its lifetime. According to the results, the average availability of a turbine over a 20-year life span was more than 0.999. At 25 points, the turbine needed repairs, and the mean time between failures was calculated to be 7008 hours. The mean time between system critical (catastrophic) failures is 77928 hours. Also, the sensitivity analysis of the model to changing input variables is presented.

Keywords: Reliability Analysis, Wind Turbine, Reliability Block Diagram Model, RAM Commander Software, Renewable Energy

که در آن R_p قابلیت اطمینان سیستم موازی و R_i قابلیت اطمینان جزء i می باشد. به طور کلی یک سیستم موازی از قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به یک سیستم سری برخوردار است که ناشی از وجود عضو مازاد در سیستم است [۲].



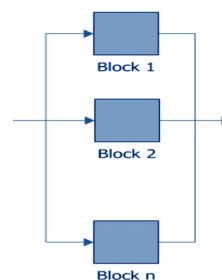
شکل ۱ بلوک دیاگرام سری

در یک سیستم سری به علت نبود عضو مازاد^۱ اگر بخشی از سیستم خراب شود، کل سیستم خراب می شود. در اکثر موارد، نمودار بلوک دیاگرام یک توربین بادی در سطح زیرسیستم، یک سیستم متوالی می باشد. این واقعیت به دلیل کاهش هزینه های ناشی از نصب عضو مازاد در سطح زیرسیستم است. به منظور ایجاد عضو مازاد در سیستم سری، به اجزای پشتیبان فعال و یا آماده به کار در سیستم نیاز خواهد بود [۲]. قابلیت اطمینان سیستم سری به صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه می شود [۴، ۶]:

$$R_S = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \quad (2)$$

$$R_S = \prod R_i \quad (3)$$

که در آن R_i قابلیت اطمینان سیستم سری و R_i قابلیت اطمینان جزء i ام است. وجود و یا عدم وجود عضو آماده به کار در سیستم بسته به مدل توربین می باشد [۷]. نمودارهای موازی برای سیستم های با عضو مازاد به کار گرفته می شوند. در این سیستم ها بلوک ها به صورت موازی به هم وصل می شوند. برای خرابی سیستم، باید همه بلوک های موجود در اتصال موازی دچار خرابی شوند [۲]. شکل ۲ نشان دهنده این امر است.



شکل ۲ بلوک دیاگرام موازی [۲]

در سیستم های موازی، حداقل یک واحد باید سالم و فعال باشد تا سیستم کار کند [۲]. قابلیت اطمینان سیستم موازی به صورت روابط ۴ تا ۶ محاسبه می شود [۸، ۹]:

$$R_p = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n) \quad (4)$$

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (5)$$

$$R_p = \prod_{i=1}^n R_i \quad (6)$$

۲-۱- نرم افزار رم کامندر

نرم افزار رم کامندر^۲ نرم افزاری جامع به منظور انجام تحلیل و پیش بینی قابلیت اطمینان و تعمیر پذیری، بهینه سازی سیاست های تعمیر و تعویض قطعات، انجام مراحل مختلف ارزیابی ریسک به روش های درخت خرابی^۳، درخت رخداد^۴، تحلیل تاثیر مد خرابی^۵، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان، تحلیل مارکوف و ارزیابی ایمنی سیستم ها می باشد. این نرم افزار شامل ماژول های تحلیل قابلیت اطمینان، خرابی، ایمنی و تعمیر و نگه داری است. در این پژوهش از ماژول بلوک دیاگرام نرم افزار رم کامندر استفاده شد. این ابزار امکان ترسیم بلوک ها در آرایش های سری و موازی را می دهد و برای تحلیل سیستم های با تعداد اجزای زیاد مناسب است. پس از مشخص کردن پیکربندی بلوک ها، اطلاعات هر بلوک می بایست وارد شود. این اطلاعات شامل نام و توصیف بلوک، تعمیر پذیری یا عدم تعمیر پذیری آن، نوع بلوک (ساده یا کازان^۶)، توزیع زمان خرابی و پارامترهای مرتبط با آن، زمان میانگین بین خرابی ها^۷ و توزیع زمان تعمیر (در صورت تعمیر پذیری بلوک) می باشد. پس از معین کردن اطلاعات تمامی بلوک ها، لازم است تا تنظیمات شبیه سازی صورت پذیرد. نرم افزار از الگوریتم تصادفی مونت کارلو^۸ برای محاسبه ی مقادیر شاخص های قابلیت اطمینان استفاده می کند و افق زمانی و دقت شبیه سازی توسط کاربر تعیین می شود. نتایج شبیه سازی شامل شاخص های تحلیل خرابی از جمله مقادیر قابلیت اطمینان، دسترس پذیری، تعمیر پذیری و زمان میانگین بین خرابی های سیستم در طول عمر آن است.

۲- پیشینه پژوهش

گزارش باد آژانس جهانی انرژی ۲۰۱۴

گزارش آژانس جهانی انرژی از انرژی بادی، به زیر بخش های زیادی تقسیم شده است. زیر بخش ۳۳ [۱۰]، به تشریح چگونگی جمع آوری و طبقه بندی اطلاعات باد و آمار خرابی توربین ها در کشورهای مورد بررسی پرداخته است و برنامه ای را برای ایجاد یک کتابخانه ی جامع از داده های قابلیت اطمینان ارائه می دهد. به طور کلی، زیر بخش ۳۳ قصد دارد تا به کمک داده های قابلیت اطمینان، ایمنی و قابلیت اطمینان توربین های بادی را افزایش دهد و سبب بهینه سازی استراتژی های تعمیر و نگه داری توربین ها شود.

گزارش آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر ۲۰۱۳

گزارش آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر در مورد قابلیت اطمینان زیر سیستم های توربین بادی، از جدیدترین تحقیقات در این زمینه می باشد. این گزارش مبتنی بر بانک های اطلاعاتی مختلفی است و دید مناسبی در مورد قابلیت اطمینان توربین های بادی و زیر سیستم های آن ها ارائه می دهد [۱۱].

گزارش آپ ویند

5. Failure mode and effect analysis (FMEA)
6. K out of N
7. Mean time between failures (MTBF)
8. Monte Carlo

1. Redundancy
2. RAM Commander
3. Fault tree analysis (FTA)
4. Event tree analysis (ETA)



۲-۲- مدل توربین باد

شکل ۴ مدل بلوک دیاگرام توربین ۲ مگاوات مورد بررسی را نشان می‌دهد. توربین باد از ۸ بلوک تعمیرپذیر که نماینده ی زیر سیستم‌ها هستند و مجموع ۹۴ جزء تشکیل شده است.

۳-۳- نرم افزار

به منظور ایجاد مدل بلوک دیاگرام توربین در نرم افزار رم کامندر، توزیع احتمال خرابی مناسب با توجه به جداول مرجع [۱۵] برای هر جزء در نظر گرفته شد. زمان تعمیر عدد ثابت در نظر گرفته شده است. زمان بازرسی در شبیه‌سازی لحاظ نشده است (تنها پس از خرابی هر جزء به آن جزء رسیدگی خواهد شد)

۴-۳- داده‌های ورودی به مدل

تمامی داده‌های به کار رفته در پژوهش بر اساس گزارش‌های آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر ۲۰۱۳ می‌باشند [۱۵، ۱۶].

۳-۵- فرضیات

در این بخش به فرضیات پژوهش پرداخته می‌شود. این فرضیات شامل فرضیات مدل سازی و تحلیل نتایج مدل است.

تمامی اجزاء قابلیت خرابی و تعمیر را دارند. تعمیر هر جز به زمان و هزینه ی متفاوتی نیاز دارد و توسط یک کارگر صورت می‌گیرد. فرض می‌شود که کارگر تعمیرات همواره در دسترس است و زمان رسیدن به محل خرابی ۱ ساعت است. تعیین زمان تأخیر ۱ ساعت برای دستیابی به بیشینه دسترس پذیری سیستم در نظر گرفته شده است (افزایش زمان تأخیر سبب کاهش دسترس پذیری خواهد شد). هر کارگر تنها قادر به تعمیر یک جزء در هر زمان می‌باشد. قطعات اضافی به منظور تعمیر، همواره موجود و کافی می‌باشند و تأخیری در تحویل قطعات وجود ندارد. توزیع ویبول^۲ به علت انعطاف پذیری در ارائه ی نرخ خرابی‌های افزایشنده، ثابت و کاهنده، نسبت به توزیع نمایی برتری دارد و در اکثر اجزاء از آن بهره برده شده است. تنظیمات شبیه‌سازی در نرم‌افزار به صورت زیر است:

- زمان شبیه‌سازی ۲۰ سال (عمر متوسط توربین‌ها برای داده‌های موجود) در نظر گرفته شده است.

- نقاط نتیجه در هر ۸۷۶ ساعت (۳۶.۵ روز) گزارش شده است.

- شبیه‌سازی با دقت متوسط^۳ صورت پذیرفته است.

به منظور تحلیل حساسیت مدل به ورودی‌های مختلف، شبیه‌سازی برای موارد نیز صورت پذیرفت:

- شبیه‌سازی برای زمان‌های تأخیر کارگر طولانی‌تر

- شبیه‌سازی با در نظر گرفتن افزایش نرخ خرابی هر جزء و اثرات آن بر شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم

گزارش آپ ویند^۱ به رتبه‌بندی سهم خرابی هر یک از زیر جزء‌های توربین بادی پرداخته است. در این گزارش مواردی از جمله احتمال خرابی هر زیر جزء، زمان‌های خرابی زیر سیستم‌ها، عوامل اثرگذار بر خرابی و سهم هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این گزارش موید آن است که اطلاع از آمار خرابی اجزا می‌تواند به اتخاذ تصمیمات صحیح در تعمیرات و نگهداری بینجامد و از هزینه‌های تحمیلی بکاهد [۱۲].

گزارش موسسه ی سوپرژن ۲۰۱۱

این گزارش به تحلیل عوامل اثرگذار بر خرابی اجزای توربین‌های بادی فراساحل و چگونگی افزایش دسترس پذیری کلی مزارع بادی و کاهش هزینه‌های انرژی می‌پردازد. بنابر نتایج این گزارش، ۷۵٪ از خرابی‌ها تنها ۵٪ از زمان‌های خاموشی را به همراه دارد و ۲۵٪ از خرابی‌ها باعث ۹۵٪ باقی‌مانده ی زمان‌های خاموشی می‌شود. سیستم الکتریکی بالاترین نرخ خرابی را دارد، اما خرابی گیربکس دارای طولانی‌ترین زمان خاموشی است [۱۳]. ژو و همکاران به بررسی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی، مدهای خرابی، علت خرابی و روش‌های شناسایی خرابی در برخی از اجزای کلیدی توربین‌های بادی پرداخته اند. روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان توربین‌های بادی و بهبود قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های خرابی موجود، به ارائه ی شیوه ای نو برای مدل‌سازی عددی و گرافیکی یک سیستم بادی به روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان پرداخته است. این روش امکان بررسی پارامترهای مهم قابلیت اطمینان از قبیل دسترس پذیری، نرخ خرابی، زمان بین خرابی‌های توربین را با انجام تحلیل حساسیت مدل و سنجش اثرگذاری آرایش اجزاء در قابلیت اطمینان یک توربین و نیز مزرعه بادی را در اختیار قرار می‌دهد.

۳- روش تحقیق

مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان مبتنی بر ایجاد بلوک‌هایی است که حاوی اطلاعاتی در مورد اجزای سیستم می‌باشند. از اتصال بلوک‌ها به یکدیگر شبکه ی بلوک دیاگرام ایجاد می‌شود. در شکل ۳ ایده ی کلی حاکم بر فرآیند شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۳ فرآیند شبیه‌سازی

۱-۱- زیر سیستم‌های توربین بادی

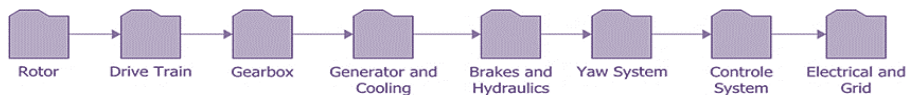
در مدل به کاررفته در این پژوهش، تمامی زیر سیستم‌ها و اجزاء در آرایش سری قرار گرفته اند و آرایش موازی به کار نرفته است. اجزای موازی در برخی زیرسیستم‌ها از جمله اجزای الکتریکی توربین می‌توانند به کار روند. به-کارگیری اجزای موازی نیازمند شناسایی اجزای آماده به کار و یدکی در هر زیرسیستم و مطالعه ی عمیق‌تر اجزای توربین می‌باشد. در این پژوهش به منظور ساده‌سازی، تمامی اجزاء و زیرسیستم‌ها در آرایش متوالی قرار گرفته اند.



انستیتو ملی تحقیقات انرژی

3. Intermediate accuracy

1. Up Wind
2. Weibull distribution



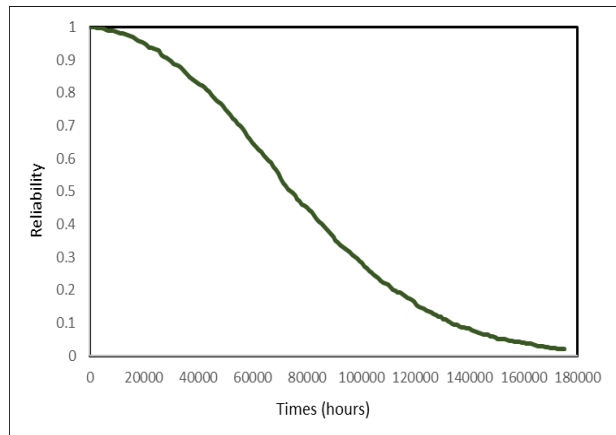
شکل ۴ مدل بلوک دیاگرام توربین بادی

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج شبیه سازی توربین

با توجه به نمودار قابلیت دسترس پذیری که در شکل ۵ نشان داده شده است، مقدار متوسط دسترس پذیری یک توربین بادی در عمر کاری آن، برابر ۰.۹۹۹۸۶۵ می باشد. همچنین در ۲۵ نقطه زمانی، مقدار دسترس پذیری به کم تر از عدد ۱ نزول می کند که نشان دهنده ی تعمیرات اجزاء سیستم می باشد. بنابراین مقدار میانگین زمان بین خرابی های کل سیستم برابر با ۷۰۰۸ ساعت است. در زمان های t_1 برابر با ۵۸۹۸۴ ساعت و t_2 برابر با ۱۶۵۵۱۵ ساعت قابلیت دسترس پذیری سیستم به کم ترین مقدار خود خواهد رسید که نشان دهنده ی خرابی های اساسی توربین است. مدت زمان میانگین بین تعمیرات اساسی^۱ برابر ۷۷۹۲۸.۷ ساعت می باشد.

نمودار قابلیت اطمینان که در شکل ۶ نشان داده شده شامل ۲۰۰ نقطه در بازه ی زمانی ۲۰ ساله ی عمر توربین است. با گذشت زمان قابلیت اطمینان سیستم کاهش می یابد (احتمال خرابی افزایش می یابد) اما به توجه به تعمیر پذیری بالای سیستم و انجام تعمیرات در زمان خرابی هر جزء، سیستم همواره دارای دسترس پذیری مناسبی خواهد بود (بیش از ۰.۹۹). تابع قابلیت اطمینان با برازش یک چند جمله ای درجه ی ۶ بر نقاط نمودار به دست آمد (معادله ی ۷). مقدار ضریب رگرسیون برازش برابر ۰.۹۹۹ می باشد. هم چنین معادله ی ۸ نشان گر تابع نرخ خرابی توربین (تعداد خرابی در واحد زمان) می باشد که از روابط تحلیلی قابل استخراج است.



شکل ۶ قابلیت اطمینان توربین بادی

۴-۲- تحلیل حساسیت مدل بلوک دیاگرام

۴-۲-۱- حساسیت به کاهش تعمیر پذیری

۹ بیانگر

رابطه ی ریاضی دسترس پذیری و زمان تأخیر کارگر می باشد.

$$A(t) = -0.0011t + 0.9939 \quad (9)$$

$A(t)$ مشخص کننده ی تابع دسترس پذیری و t زمان تأخیر کارگر

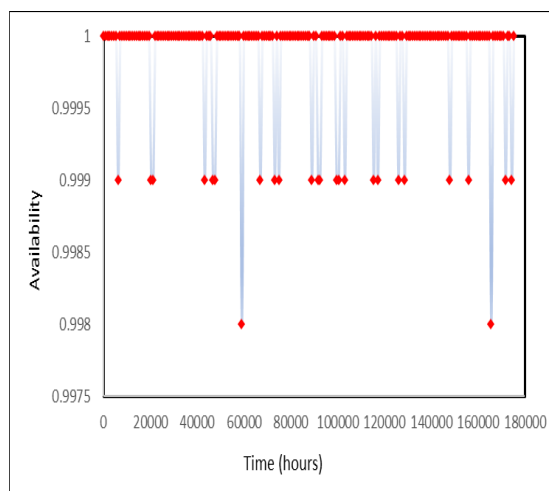
است.

۴-۲-۲- حساسیت به افزایش نرخ خرابی

نتایج پژوهش های پیشین نشان می دهد که از بین زیر سیستم های موجود جعبه دنده، ژنراتور و هاب دارای احتمال خرابی بالاتر در شرایط متغیر باد می باشند [۱۷]. به همین سبب نرخ خرابی جعبه دنده افزایش داده شد و تاثیر آن بر سیستم تحلیل گردید. جدول ۲ نشان دهنده ی تأثیر افزایش نرخ خرابی دو بلاک (چرخ دنده و یاتاقان از جعبه دنده) بر پارامترهایی نظیر دسترس پذیری و زمان خاموشی کل توربین می باشد.

$$R(t) = 4 \times 10^{-31}t^6 - 2 \times 10^{-25}t^5 + 4 \times 10^{-20}t^4 - 3 \times 10^{-15}t^3 + 3 \times 10^{-12}t^2 - 2 \times 10^{-0.6}t + 1.0035 \quad (7)$$

که در آن $R(t)$ تابع قابلیت اطمینان و t زمان می باشد.



شکل ۵ قابلیت دسترس پذیری توربین بادی

1. MTBCF



$$Z(t) = - \frac{(24 \times 10^{-31})t^5 - (10^{-24})t^4 + (16 \times 10^{-20})t^3 - (9 \times 10^{-15})t^2 + (6 \times 10^{-12})t - 2 \times 10^{-6}}{(4 \times 10^{-31})t^6 - (2 \times 10^{-25})t^5 + (4 \times 10^{-20})t^4 - (3 \times 10^{-15})t^3 + (3 \times 10^{-12})t^2 - (2 \times 10^{-6})t + 1.0035} \quad (8)$$

که در آن $Z(t)$ تابع نرخ خرابی و t زمان می‌باشد.

- هزینه‌های عملیاتی در طول عمر توربین

- هزینه ی زیرسیستم‌ها

- قیمت تمام شده ی برق تولیدی

(۵) تمایز احتمال خرابی در زمستان و تابستان

(۶) مدل سازی با لحاظ تأثیرات آب و هوا و محیط

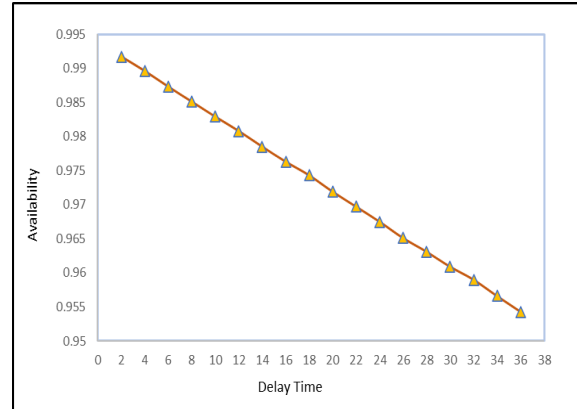
(۷) بهبود تحلیل حساسیت مدل

(۸) بهره‌گیری از زبان‌های برنامه‌نویسی مانند ++C، پایتون و متلب که قابلیت و انعطاف‌پذیری بالایی در انجام تحلیل حساسیت دارند و همچنین می‌توانند داده‌های سیستم جمع‌آوری داده^۱ را به عنوان ورودی به صورت لحظه‌ای دریافت و مدل را بهبود بخشد.

روش پژوهش تکوین شده در این مقاله، روشی اسلوب‌مند و مدون است که پتانسیل استفاده برای سایر سیستم‌های پیچیده ی انرژی های تجدیدپذیر از جمله سیستم‌های خورشیدی و زمین گرمایی را داراست.

۶- مراجع

- [1] *Wind Power Capacity Worldwide*, Accessed 19 May 2021; <https://wwindea.org>.
- [2] S. Einarsson, *Wind turbine reliability modeling*, MSc Thesis in Sustainable Energy Engineering, Reykjavik University, Iceland, 2016.
- [3] R. Billinton and RN. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems*, New York: Plenum press, 1992.
- [4] S. Nigel, S. Chambers, and R. Johnston. *Operations management*, Pearson education, 2010.
- [5] S. Sheng and P. Veers, Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring - An Overview. *Proceedings of the Mechanical Failures Prevention Group, Applied Systems Health Management Conference*, 2011.
- [6] *RBDs and Analytical System Reliability*, Accessed 19 May 2021; http://www.reliawiki.com/index.php/RBDs_and_Analytical_System_Reliability.
- [7] B. Domingues, *Wind Turbine Reliability and OPEX forecasting*, 2015.
- [8] M. Sheldon, *Introductin To Probability And Statistics For Engineers And Scientists*. First Edit., United Kingdom: John Wiley & Sons, 1987.
- [9] A. Hoyland and M. Rausand, *System reliability theory: models and statistical methods*, Second Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [10] *IEA Annual Wind Report 2014 Task 33*, Accessed 19 May 2021; http://www.ieawind.org/task_33.html.
- [11] S. Sheng, *Report on wind turbine subsystem reliability-a survey of various databases*, National Renewable Energy Lab (NREL), 2013.
- [12] S. Faulstich, P. Lyding, and B. Hahn, Component reliability ranking with respect to WT concept and external environmental conditions, *Integrated Wind Turbine Design Upwind Deliverable WP7*, 2010.
- [13] P. Tavnar, *How are we going to make offshore wind farms more reliable?*, Supergen Wind report, 2011.
- [14] *Reliability Analysis of Wind Turbines*, Accessed 19 May 2021; <https://www.intechopen.com/books/stability-control-and-reliable-performance-of-wind-turbines>.
- [15] M. Martin-Tretton, M. Reha, M. Drunic, M. Keim, *Data Collection for Current US Wind Energy Projects: Component Costs, Financing, Operations, and Maintenance*, National Renewable Energy Lab (NREL), 2012.
- [16] R. Poore and C. Walford, *Development of an Operations and Maintenance Cost Model to Identify Cost of Energy Savings for Low*



شکل ۷ دسترس‌پذیری توربین بر حسب زمان تأخیر کارگر

جدول ۲ تأثیر افزایش نرخ خرابی جعبه‌دنده بر پارامترهای قابلیت اطمینان توربین

شرایط پایه	شرایط افزایش نرخ خرابی	
دسترس پذیری	٪۹۹	٪۹۹.۱
زمان خاموشی (ساعت)	۱۶۸۹	۱۵۷۷

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر از مدل بلوک‌دیگرام قابلیت اطمینان به منظور تحلیل قابلیت اطمینان توربین بادی بهره گرفته و شبیه‌سازی و اخذ نتایج در نرم افزار رم- کامندر صورت پذیرفته است. نتایج شامل شاخص‌های کلیدی قابلیت اطمینان یک توربین باد و تحلیل حساسیت مدل می‌باشد. مقدار میانگین دسترس پذیری توربین باد در دوره ی ۲۰ ساله ی عمر آن، بیش از ۰.۹۹۹ محاسبه شد. در ۲۵ نقطه ی زمانی توربین نیازمند تعمیرات است و زمان میانگین بین خرابی‌ها برابر ۷۰۰۸ ساعت می‌باشد. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که کاهش تعمیرپذیری و افزایش نرخ خرابی اجزای سیستم، هر دو سبب کاهش دسترس‌پذیری کل سیستم توربین باد می‌شود.

اقداماتی که به منظور بهبود نتایج این پژوهش، در مطالعات آتی می‌تواند مدنظر قرار گیرد به صورت خلاصه شامل موارد زیر است:

(۱) افزایش دقت مدل

- در نظر گرفتن تعداد بیشتری از اجزاء

- تحلیل عمیق‌تر و موشکافانه‌تر زیر سیستم‌ها و اجزای سیستم

- استفاده از اجزای مازاد در سیستم و بهره‌گیری از ساختار موازی

- به‌کارگیری توزیع‌های احتمال مناسب برای توصیف زمان تعمیر، زمان تأخیر

(۲) استفاده از داده‌های نیروگاه های باد داخل کشور

(۳) لحاظ کردن محدودیت در تعداد قطعات اضافی و زمان تحویل آنها

Wind Speed Turbines, National Renewable Energy Lab (NREL), 2008.

[17] G. Wilson, D. McMillan and G. Ault, Modelling the effects of the environment on wind turbine failure modes using neural networks, *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012)*, pp. 1-6, 2012.

