

بررسی تاثیر عمر قطعات بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی با استفاده از مدل‌سازی مارکوف

محمد مهدی نصیری^۱، سید یوسف موسی زاده موسوی^۱، سید سعید حیدری یزدی^۲

^۱ مهندسی برق، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، ایران m.nasiri12@umail.umz.ac.ir

^۲ مهندسی و علم داده، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه نور سلطان نظر بایف، قزاقستان

چکیده

این مقاله به بررسی تاثیر افزایش عمر قطعات بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی با استفاده از مدل‌سازی مارکوف می‌پردازد. در ابتدا نرخ خرابی متغیر با زمان هریک از اجزای تشکیل‌دهنده توربین با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول محاسبه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن اجزای اصلی توربین مانند پره‌های روتور، ترمز هوایی، ژنراتور و ... زنجیره مارکوف تشکیل شده و معادلات دیفرانسیل مربوط به آن حل می‌گردد. در ادامه، با اعمال مدل برای دو نمونه توربین آلمانی و دانمارکی، قابلیت اطمینان آنها محاسبه و مقایسه شده‌است و تاثیر تغییر پارامترهای تابع توزیع ویبول بر افزایش قابلیت اطمینان توربین‌ها نیز بررسی گردیده‌است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی مبتنی بر زنجیره مارکوف و محاسبه نرخ خرابی متغیر، روشی دقیق برای ارزیابی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی به شمار می‌رود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی مارکوف، نرخ خرابی متغیر، قابلیت اطمینان، تابع توزیع احتمال ویبول، معادلات دیفرانسیل.

۱. مقدمه

امروزه توربین‌های بادی به عنوان یکی از مهمترین منابع تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر مطرح هستند (F.M. Ayoub, 2020). استفاده از انرژی باد به دلیل تولید انرژی بدون آلودگی، در دسترس بودن منابع و قیمت پایین‌تر آن نسبت به سایر منابع انرژی، رشد قابل توجهی داشته‌است (Arshad & O'Kelly, 2013). توربین‌های بادی متشکل از اجزا و زیرسیستم‌های متعددی هستند که هر کدام نقش مهمی در تبدیل انرژی باد به الکتریسیته دارند. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده توربین‌های بادی شامل پره‌های روتور، ترمز هوایی، ترمز مکانیکی، محور اصلی، گیربکس، ژنراتور، سیستم خم‌کننده، کنترل‌های الکتریکی، سیستم هیدرولیکی، سیستم الکتریکی شبکه و سیستم کنترل مکانیکی یا پیچش پره‌ها می‌باشد (Tavner et al., 2007). توربین‌های بادی بر اساس محور چرخش آن‌ها به دو دسته افقی و عمودی تقسیم می‌شوند که توربین‌های بادی افقی محور چرخش روتور موازی با سطح زمین دارند و معمولاً دارای سه پره هستند. در توربین‌های بادی عمودی محور چرخش عمود بر سطح زمین قرار دارد و این توربین‌ها اغلب تنها یک پره دارند (Wen et al., 2009). عملکرد اصلی همه انواع توربین‌های بادی، تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی چرخشی و سپس تبدیل آن به انرژی الکتریکی است، اما تفاوت‌هایی در طراحی، اندازه، ظرفیت تولید، میزان قابلیت اطمینان و هزینه‌های نگهداری بین انواع مختلف توربین‌های بادی وجود دارد (Malakouti, 2023). از نظر عملیاتی نیز شالوده و برج به عنوان زیرساخت توربین‌های بادی مسئول پایداری و قابلیت اطمینان کل سیستم هستند. طراحی این زیرساخت‌ها برای توربین‌های بادی ساحلی و خصوصاً فراساحلی با چالش‌های زیادی همراه است. مصالح و طراحی‌های نوین می‌توانند در بهبود عملکرد این سازه‌ها کمک کنند و پایداری آن‌ها در برابر بارهای محیطی پویا و شرایط سخت آب و هوایی را بالا ببرند. در کنار این مسائل مدل‌سازی رفتار دینامیکی سازه‌های توربین بادی و در نظر گرفتن تأثیر شرایط محیطی سخت بر عملکرد توربین‌های بادی فراساحلی اهمیت بسزایی در احداث این نیروگاه‌ها دارد (Horn & Leira, 2019; Wen et al., 2009).

ارزیابی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی نیز بسیار مهم است و عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی سخت، بارهای دینامیکی وارده، خطا و خرابی اجزا می‌توانند بر قابلیت اطمینان توربین تأثیر بگذارند (Horn & Leira, 2019; Wen et al., 2009). ارزیابی قابلیت اطمینان به ما کمک میکند تا بتوانیم عمر مفید و در دسترس بودن توربین را به خوبی پیش‌بینی کرده و تصمیمات مناسبی در زمینه انتخاب نوع توربین، تعیین زمان‌بندی تعمیر و نگهداری و بهینه‌سازی عملکرد آن بگیریم (J. Wang et al., 2021). روش‌های متعددی از جمله روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای ارزیابی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی به کار گرفته می‌شود (Tavner et al., 2007). بنابراین، توربین بادی یک سیستم بسیار پیچیده است و ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان آن می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد، افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های تولید انرژی کمک شایانی کند (Malakouti, 2023). مطالعات متعددی در زمینه قابلیت اطمینان توربین‌های بادی شده است اما هیچ یک از آن‌ها اثر افزایش عمر قطعات را در نظر نگرفته‌اند و مدلسازی‌های ساده‌تری برای ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده کرده‌اند.

در این مطالعه به منظور ارزیابی دقیق‌تر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی، از روش مبتنی بر مدلسازی مارکوف بهره گرفته شده است. ابتدا با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول، نرخ خرابی متغیر با زمان هر یک از تجهیزات تشکیل‌دهنده توربین محاسبه گردید. سپس با توجه به اجزای اصلی تشکیل‌دهنده توربین‌های بادی همچون پره‌های روتور، ترمز هوایی و ترمز مکانیکی و... زنجیره مارکوف توربین تشکیل شده است. سپس با تشکیل معادلات دیفرانسیل زنجیره مارکوف و حل آن‌ها، قابلیت اطمینان و عدم قابلیت اطمینان هر یک از توربین‌های آلمانی و دانمارکی با تغییر پارامترهای تابع توزیع ویبول و در نظر گرفتن تأثیر عمر تجهیزات بر قابلیت اطمینان محاسبه شده است.

۲. مدلسازی مارکوف

۲.۱. نرخ خرابی متغیر با زمان

به منظور ارزیابی دقیق‌تر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی مبتنی بر زنجیره مارکوف ابتدا با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول نرخ خرابی متغیر با زمان هر یک تجهیزات تشکیل‌دهنده توربین مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید. در این رابطه، λ_0 نرخ خرابی ثابت تجهیزات می‌باشد و a و b پارامترهای تابع توزیع ویبول می‌باشند (Guo et al., 2020).

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & t \leq t_1 \\ a \cdot \lambda_0 \cdot t^{b-1} & t > t_1 \end{cases} \quad (1)$$

مقادیر λ_0 نیز برای هریک از توربین‌های آلمانی و دانمارکی برای هریک از قطعات بصورت جدول ۱ و ۲ بیان می‌شود:

جدول ۱. نرخ خرابی ثابت توربین‌های آلمانی

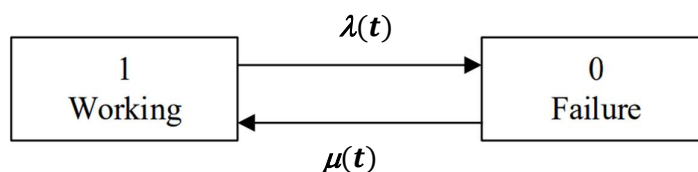
نام قطعه	مدت زمان میانگین تا خرابی (ساعت)	نام قطعه	مدت زمان میانگین تا خرابی (ساعت)
پره‌های روتور	۳۹,۲۹۷	سیستم خم‌کننده	۶۹,۵۰۴
ترمز هوایی	۱۸۰,۰۷۸	کنترل‌های الکتریکی	۳۹,۲۰۵
ترمز مکانیکی	۲۲۳,۴۴۷	سیستم هیدرولیکی	۷۹,۳۶۳
محور اصلی	۳۶۵,۳۳۹	سیستم الکتریکی شبکه	۲۵,۷۰۸
گیربکس	۸۷,۱۷۴	سیستم کنترل مکانیکی	۹۰,۴۷۲
ژنراتور	۷۳,۲۳۴	دیگر قطعات	۲۵,۴۴۹

جدول ۲. نرخ خرابی ثابت توربین‌های دانمارکی

نام قطعه	مدت زمان میانگین تا خرابی (ساعت)	نام قطعه	مدت زمان میانگین تا خرابی (ساعت)
پره‌های روتور	۲۵۲,۰۳۳	سیستم خم‌کننده	۳۱۸,۹۰۳
ترمز هوایی	۱,۲۸۶,۰۵۰	کنترل‌های الکتریکی	۱۷۵,۵۶۱
ترمز مکانیکی	۶۲۷,۰۵۵	سیستم هیدرولیکی	۲۸۵,۱۹۵
محور اصلی	۸۰۷,۱۷۴	سیستم الکتریکی شبکه	۴۵۰,۶۴۳
گیربکس	۲۱۸,۸۷۱	سیستم کنترل مکانیکی	۱,۲۳۶,۷۱۲
ژنراتور	۳۶۵,۵۳۴	دیگر قطعات	۵۱,۸۷۱

۲.۲ زنجیره مارکوف

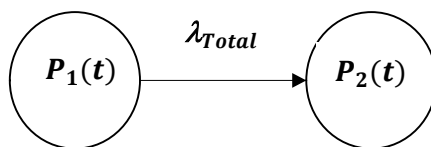
هرچقدر تعداد اجزای تشکیل دهنده یک سیستم بیشتر باشد، آنگاه مدل مارکوف مربوطه نیز پیچیده‌تر خواهد بود. اجزایی که برای ارزیابی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی در این مطالعه در نظر گرفته شده است، شامل پره‌های روتور، ترمز هوایی، ترمز مکانیکی، محور اصلی، گیربکس، ژنراتور، سیستم خم‌کننده، کنترل‌های الکتریکی، سیستم هیدرولیکی، سیستم الکتریکی شبکه و سیستم کنترل مکانیکی یا پیچش پره‌ها می‌باشد. از طرفی برای عملکرد صحیح توربین‌های بادی لازم است تا تمامی این اجزا عملکردی بدون عیب و نقص داشته باشند. لذا در این مطالعه برای هر تجهیز تنها دو حالت عملکرد صحیح و حالت از کار افتادگی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است:



شکل ۱. مدل فضای حالت هر قطعه با نرخ خرابی

به منظور تشکیل مدل مارکوف برای توربین‌ها دو حالت کلی در نظر گرفته می‌شود که حالت اول مربوط به عملکرد صحیح و حالت دوم مختص به عملکرد نادرست آن‌ها می‌باشد. پس از تعیین حالت‌های سیستم مورد نظر می‌بایست نرخ گذار از حالت اول به حالت دوم مشخص شود که مطابق با حالات در نظر گرفته شده، خرابی هر یک از قطعات جدول ۱ برای توربین‌های آلمانی و جدول ۲ برای توربین‌های دانمارکی موجب ورود سیستم به حالت خطا می‌شود، لذا مجموع نرخ خرابی توربین‌ها مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود که به عنوان نرخ گذار سیستم از حالت ۱ به حالت ۲ در نظر گرفته می‌شود (Jahani et al., 2022; Kirby, 2001; Sulaeman et al., 2017).

$$\lambda_{Total} = \sum \lambda_i \quad (2)$$



شکل ۲. مدلسازی مارکوف توربین‌های آلمانی و دانمارکی.

در مدل مارکوف شکل ۲، $P_1(t)$ ، $P_2(t)$ و λ_{Total} به ترتیب حالت عملکرد صحیح سیستم، حالت عملکرد خطای سیستم و مجموع نرخ خرابی مبتنی بر زمان تمامی تجهیزات می‌باشند. (El Mountassir, 2015; Ela et al., 2012; Li et al., 2020; B. Wang et al., 2016)

۳.۲ معادلات دیفرانسیل

در ادامه، برای ارزیابی قابلیت اطمینان توربین‌های بادی مبتنی بر زنجیره ماکوف به روش معادلات دیفرانسیل باید معادلات مربوط به مدل شکل را مطابق رابطه‌ی (۳) تشکیل داد. (Roy-Billinton-Transmission-System-Reliability, n.d.)

$$\frac{d}{dt} [P_1(t) \ P_2(t)] = [P_1(t) \ P_2(t)] \begin{bmatrix} -\lambda_{Total} & \lambda_{Total} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

از آنجایی که معمولاً سیستم‌ها از حالت سالم شروع به کار می‌کنند بنابراین شرایط اولیه مطابق رابطه‌ی (۴) خواهد بود:

$$P(0) = [1 \ 0] \quad (4)$$

با حل معادلات دیفرانسیل رابطه ۳ مقادیر $P_1(t)$ و $P_2(t)$ بدست می‌آید و با توجه به این که حالت ۱ عملکرد صحیح و حالت ۲ خطای سیستم می‌باشد، لذا $P_1(t)$ قابلیت اطمینان و $P_2(t)$ عدم قابلیت اطمینان توربین‌ها را بیان می‌کنند که از روابط (۳) و (۴) بدست می‌آیند:

$$R(t) = P_1(t) \quad (5)$$

$$Q(t) = P_2(t) \quad (6)$$

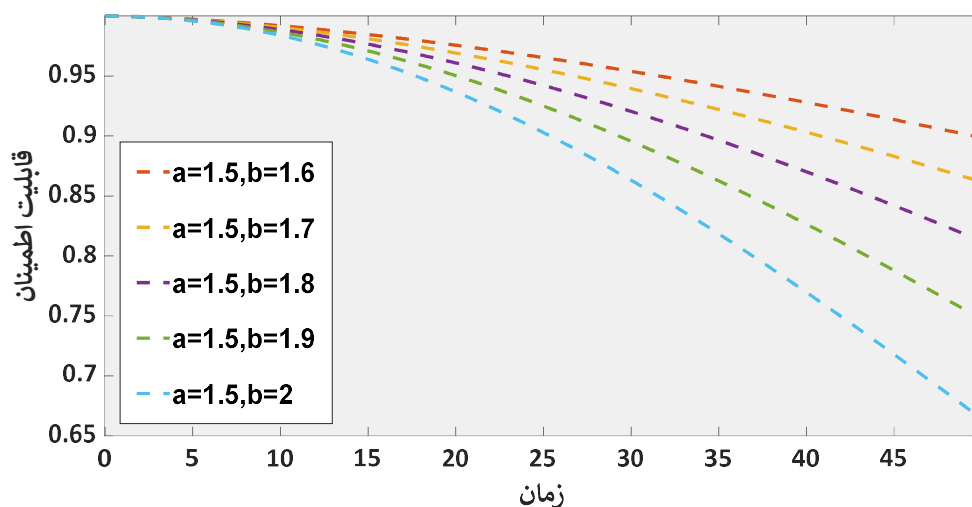
روابط (۵) و (۶) بترتیب قابلیت اطمینان و عدم قابلیت اطمینان توربین‌ها می‌باشند.

۳. مطالعه موردی

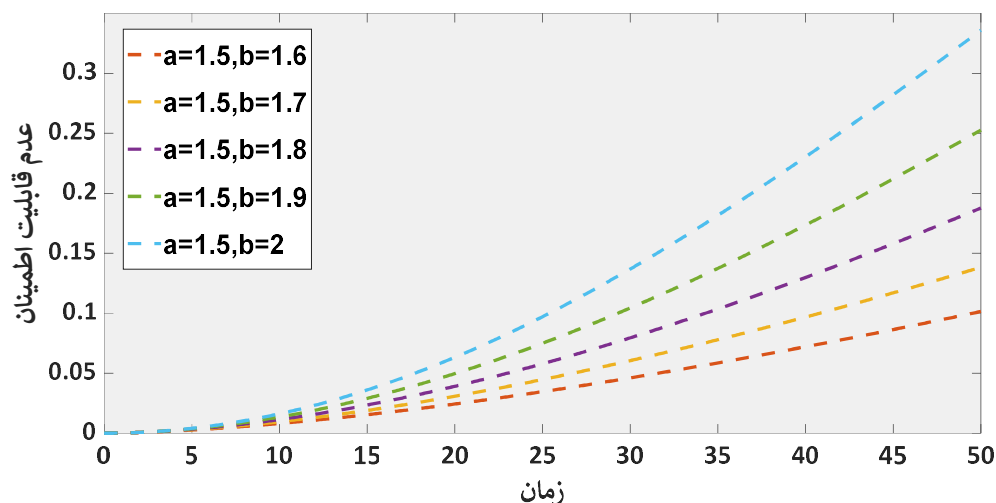
برای بررسی مواردی که در بخش‌های قبلی این مطالعه ذکر شد ابتدا با تشکیل مدل ماکوف مربوط به توربین‌های آلمانی مقادیر قابلیت اطمینان و عدم قابلیت اطمینان این توربین‌ها با تغییر پارامتر b تابع نرخ خرابی متغیر با زمان ویبول در جدول ۳ محاسبه شده و نمودار مربوط به هر یک از آن‌ها در شکل ۳ و ۴ لحاظ گردیده‌است. مطابق با آنچه در شکل‌های ۳ و ۴ نمایان است، هرچه مقدار پارامتر b افزایش پیدا کند، قابلیت اطمینان توربین‌ها کاهش و عدم آن افزایش پیدا می‌کند که مقادیر محاسبه شده می‌تواند کمک بسزایی برای پیش‌بینی بهتر قابلیت اطمینان در بلند مدت کند. از طرفی انتخاب قطعاتی که نرخ خرابی پایه کمتری دارند تأثیر زیادی بر بهبود قابلیت اطمینان توربین‌ها نیز دارند.

جدول ۳. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان و عدم آن با مقادیر ثابت a و متغیر b توربین‌های آلمانی

پارامترهای تابع توزیع ویبول	$a = 1.5$ $b = 1.6$	$a = 1.5$ $b = 1.7$	$a = 1.5$ $b = 1.8$	$a = 1.5$ $b = 1.9$	$a = 1.5$ $b = 2$
قابلیت اطمینان	۰.۸۹۸۶	۰.۸۶۱۷	۰.۸۱۲۳	۰.۷۴۷۳	۰.۶۶۴۱
عدم قابلیت اطمینان	۰.۱۰۱۴	۰.۱۳۸۳	۰.۱۸۷۷	۰.۲۵۲۷	۰.۳۳۵۹



شکل ۳. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت a و متغیر b توربین‌های آلمانی



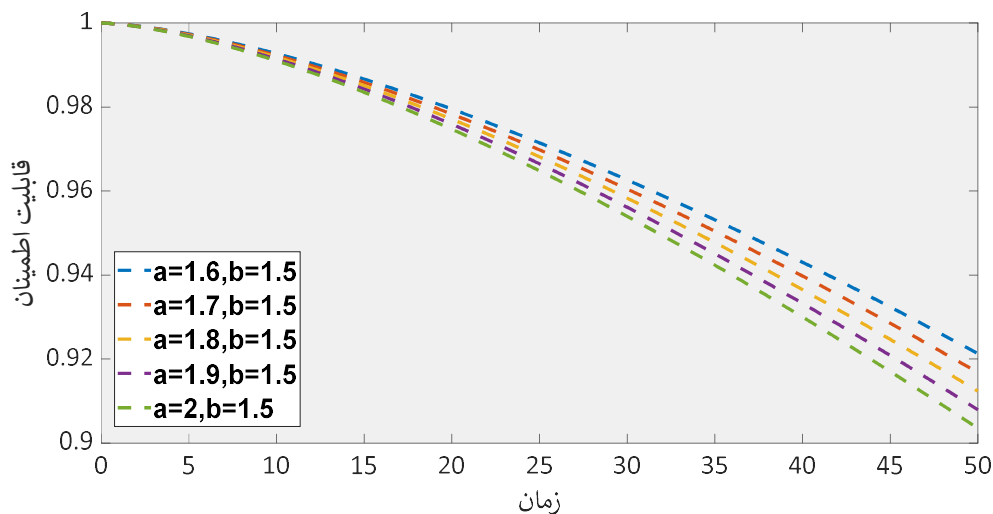
شکل ۴. آنالیز حساسیت عدم قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت a و متغیر b توربین‌های آلمانی

مجدداً با تشکیل مدل مارکوف همانطور که در شکل ۲ بیان شده‌است، برای بررسی حساسیت قابلیت اطمینان نسبت به پارامتر a تابع نرخ خرابی متغیر با زمان ویبول، مقادیر پارامتر a متغیر و مقادیر b ثابت در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از

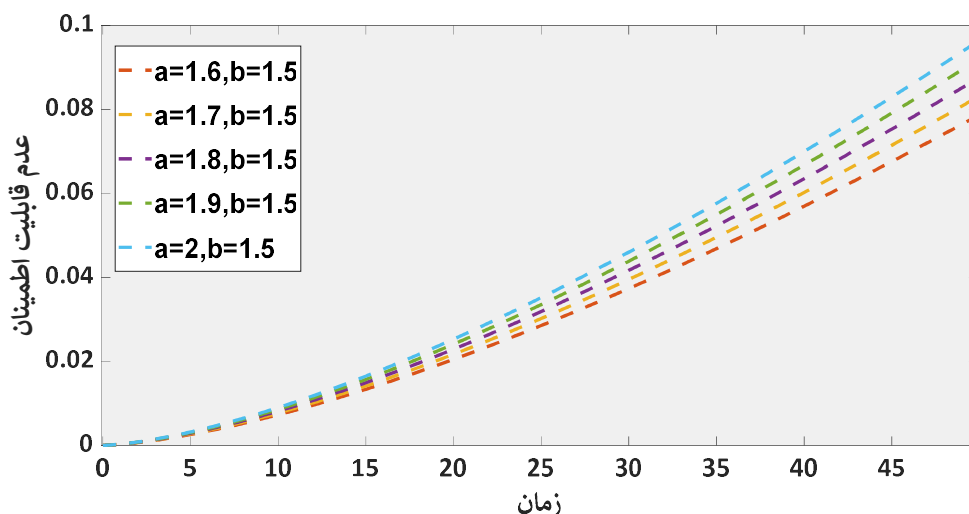
این تغییرات در جدول ۴ یادداشت شده است و نمودار مربوط به قابلیت اطمینان و عدم آن در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج پیداست افزایش پارامتر b نسبت به پارامتر a در افت قابلیت اطمینان توربین‌ها تاثیر بسیار کمتری دارد.

جدول ۴. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان و عدم آن با مقادیر ثابت b و متغیر a توربین‌های آلمانی

پارامترهای تابع توزیع ویبول	$a = 1.6$	$a = 1.7$	$a = 1.8$	$a = 1.9$	$a = 2$
	$b = 1.5$	$b = 1.5$	$b = 1.5$	$b = 1.5$	$b = 1.5$
قابلیت اطمینان	۰.۹۲۱۳	۰.۹۱۶۸	۰.۹۱۲۳	۰.۹۰۷۹	۰.۹۰۳۵
عدم قابلیت اطمینان	۰.۰۷۸۷	۰.۰۸۳۲	۰.۰۸۷۷	۰.۰۹۲۱	۰.۰۹۶۵



شکل ۵. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت b و متغیر a توربین‌های آلمانی



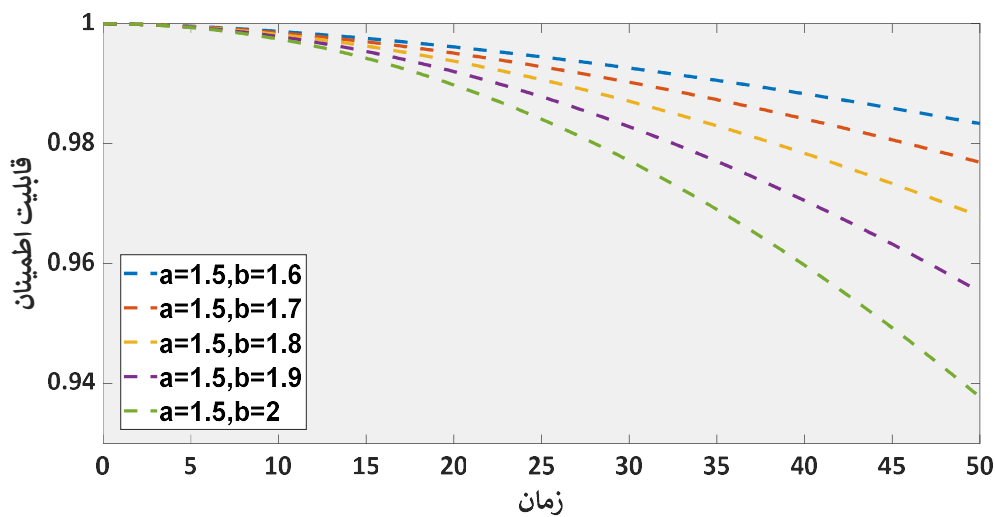
شکل ۶. آنالیز حساسیت عدم قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت b و متغیر a توربین‌های آلمانی

برای بررسی قابلیت اطمینان توربین‌های دانمارکی مطابق با آنچه برای توربین‌های آلمانی در نظر گرفته شد باید نرخ خرابی مربوط به تک تک قطعات مربوط به این توربین‌ها را وارد کرده و مدل مارکوف مربوط به آن‌ها تشکیل داده شود. پس مدل‌سازی و

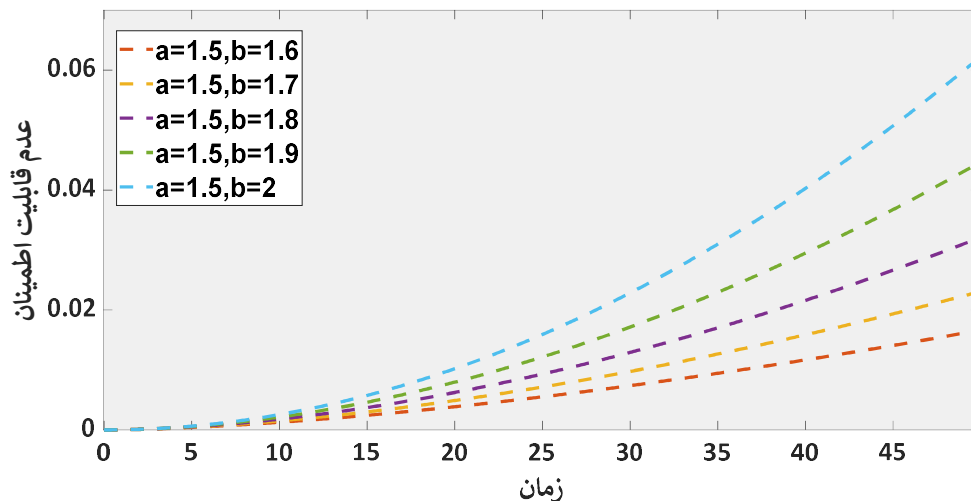
محاسبه معادلات دیفرانسیلی، مقادیر قابلیت اطمینان و عدم آن برای حالتی که پارامتر b تابع نرخ خرابی متغیر با زمان و ویبول متغیر است بدست می‌آید و نتایج آن در جدول ۵ محاسبه شده و نمودار مربوط به هریک از آن‌ها در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده‌است.

جدول ۵. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان و عدم آن با مقادیر ثابت a و متغیر b توربین‌های دانمارکی

پارامترهای تابع توزیع ویبول	$a = 1.5$ $b = 1.6$	$a = 1.5$ $b = 1.7$	$a = 1.5$ $b = 1.8$	$a = 1.5$ $b = 1.9$	$a = 1.5$ $b = 2$
قابلیت اطمینان	۰.۹۸۳۳	۰.۹۷۶۹	۰.۹۶۷۹	۰.۹۵۵۳	۰.۹۳۷۸
عدم قابلیت اطمینان	۰.۰۱۶۷	۰.۰۲۳۱	۰.۰۳۲۱	۰.۰۴۴۷	۰.۰۶۲۲



شکل ۷. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت a و متغیر b توربین‌های دانمارکی

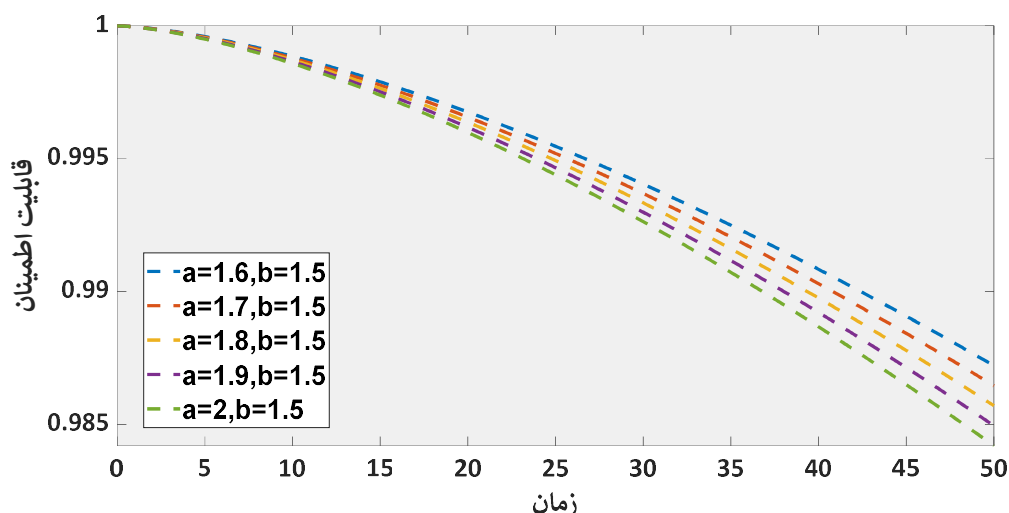


شکل ۸. آنالیز حساسیت عدم قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت a و متغیر b توربین‌های دانمارکی

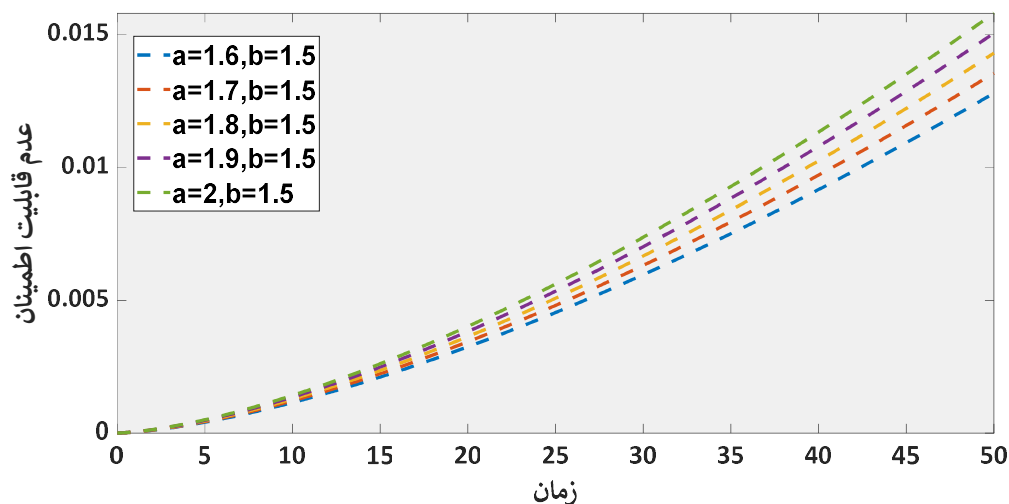
مطابق با آنچه در قسمت‌های قبل انجام داده شده است برای بررسی تأثیر بررسی آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان توربین‌های دانمارکی نسبت به پارامتر a تابع نرخ خرابی متغیر با زمان ویبول، مقادیر پارامتر a متغیر و مقادیر b ثابت در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از این تغییرات در جدول ۶ یادداشت شده و نمودار مربوط به قابلیت اطمینان و عدم آن در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌است. همانطور که از نتایج پیداست افزایش پارامتر b نسبت به پارامتر a در افت قابلیت اطمینان توربین‌ها تأثیر بسیار کمتری دارد.

جدول ۶. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان و عدم آن با مقادیر ثابت b و متغیر a توربین‌های دانمارکی

پارامترهای تابع توزیع ویبول	$a = 1.6$ $b = 1.5$	$a = 1.7$ $b = 1.5$	$a = 1.8$ $b = 1.5$	$a = 1.9$ $b = 1.5$	$a = 2$ $b = 1.5$
قابلیت اطمینان	۰.۹۸۷۲	۰.۹۸۶۵	۰.۹۸۵۷	۰.۹۸۴۹	۰.۹۸۴۲
عدم قابلیت اطمینان	۰.۰۱۲۸	۰.۰۱۳۵	۰.۰۱۴۳	۰.۰۱۵۱	۰.۰۱۵۸



شکل ۹. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت b و متغیر a توربین‌های دانمارکی

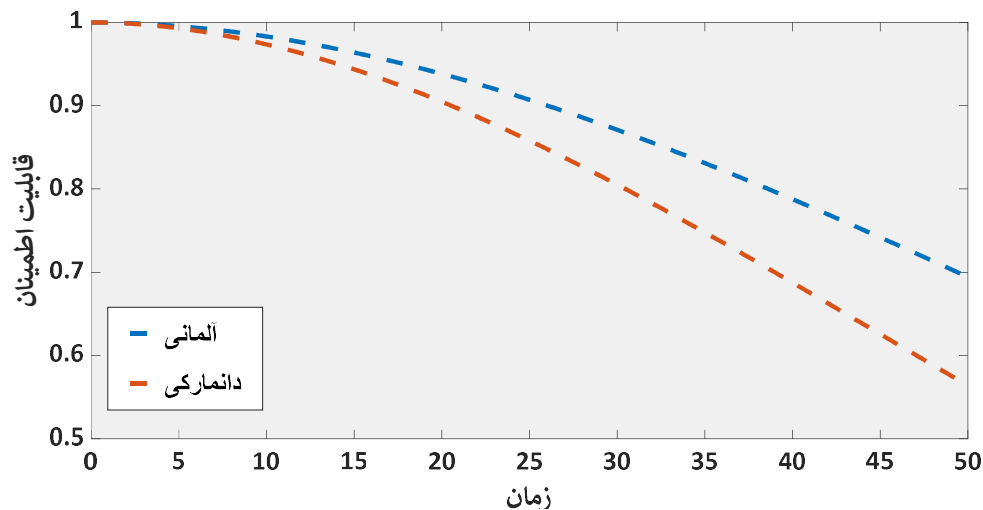


شکل ۱۰. آنالیز حساسیت قابلیت اطمینان با مقادیر ثابت b و متغیر a توربین‌های دانمارکی

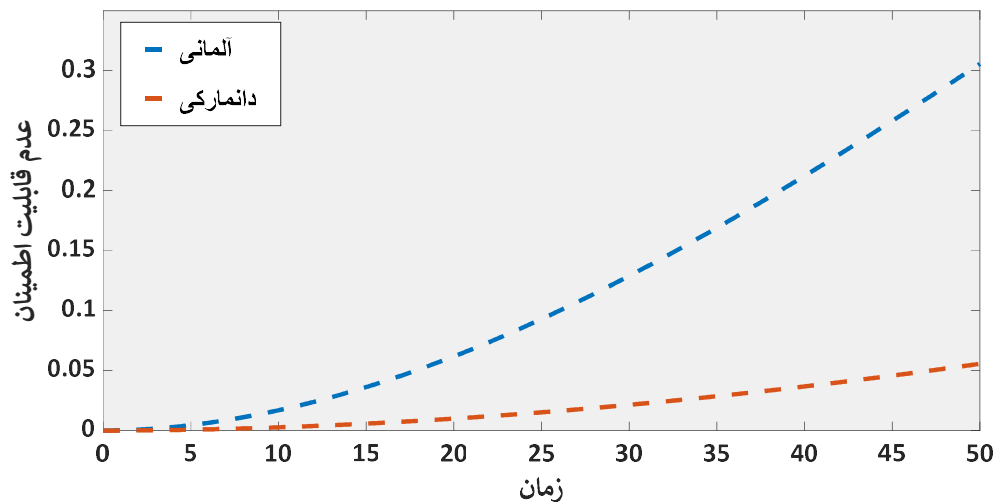
در انتها برای مقایسه قابلیت اطمینان توربین‌های آلمانی و دانمارکی و در شرایطی که قطعات هردوی این توربین‌ها با پارامترهای مشابهی در تابع توزیع ویبول فرسوده شوند، مقادیر قابلیت اطمینان و عدم آن در جدول ۷ و شکل ۱۱ و ۱۲ آورده شده است و همانطور که از نتایج پیداست قابلیت اطمینان توربین‌های دانمارکی نسبت به توربین‌های آلمانی بسیار ایده‌آل تر است.

جدول ۷. مقایسه قابلیت اطمینان توربین دانمارکی و آلمانی

نوع توربین	آلمانی	دانمارکی
قابلیت اطمینان	۰.۶۹۴۳	۰.۹۴۴۳
عدم قابلیت اطمینان	۰.۳۰۵۷	۰.۰۵۵۷



شکل ۱۱. مقایسه قابلیت اطمینان توربین دانمارکی و آلمانی



شکل ۱۲. مقایسه قابلیت اطمینان توربین دانمارکی و آلمانی

۴. نتیجه‌گیری

مشاهده می‌شود که توربین‌های بادی دانمارکی دارای قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به توربین‌های آلمانی می‌باشند. همچنین با کاهش پارامتر a و b که مربوط به پارامترهای تابع توزیع احتمال ویبول می‌باشند، قابلیت اطمینان توربین‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مقادیر تابع توزیع احتمال مربوط به نرخ خرابی تأثیر قابل توجهی بر قابلیت اطمینان توربین‌های بادی دارد و نتایج حاصل شده بسیار دقیق‌تر از مدلسازی‌های با نرخ خرابی ثابت می‌باشند، به همین دلیل مدل‌سازی مبتنی بر زنجیره مارکوف، روش مناسبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان این گونه سیستم‌های پیچیده به شمار می‌آید.

مراجع

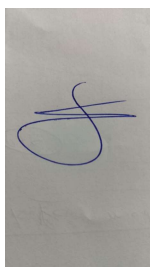
- 1- Arshad, M., & O'Kelly, B. C. (2013). Offshore wind-turbine structures: A review. In *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy* (Vol. 166, Issue 4, pp. 139–152). Thomas Telford Services Ltd. <https://doi.org/10.1680/ener.12.00019>
- 2- El Mountassir, O. (2015). *HVDC transmission cables in the offshore wind industry: reliability and condition monitoring*. December. <http://www.tennet.eu/nl/news/article/tennet-and-mitsubishi-corporation-extend-partnership-in-ger>
- 3- Ela, E., Kirby, B., Navid, N., & Smith, J. C. (2012). Effective ancillary services market designs on high wind power penetration systems. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345361>
- 4- F.M. Ayoub, M. (2020). Reliability Assessment of Wind Turbines. In *Design Optimization of Wind Energy Conversion Systems with Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89747>
- 5- Guo, L., Ding, Y., Bao, M., Shao, C., Wang, P., & Goel, L. (2020). Nodal Reliability Evaluation for a VSC-MTDC-Based Hybrid AC/DC Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(3), 2300–2312. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2951711>
- 6- Horn, J. T., & Leira, B. J. (2019). Fatigue reliability assessment of offshore wind turbines with stochastic availability. *Reliability Engineering and System Safety*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106550>
- 7- Jahani, K., Langlois, R. G., & Afagh, F. F. (2022). Structural dynamics of offshore Wind Turbines: A review. In *Ocean Engineering* (Vol. 251). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111136>
- 8- Kirby, N. M. (2001). HVDC transmission for large offshore windfarms. *Seventh International Conference on AC and DC Transmission*, 2001(485), 162–168. <https://doi.org/10.1049/cp:20010536>
- 9- Li, J., Yin, J., Guan, Y., Wang, Z., Niu, T., Zhen, H., Han, Z., & Guo, X. (2020). A Review on Topology, Operating and Control Methods of HVDC Transmission System for Offshore Wind Farms. *E3S Web of Conferences*, 165, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016506012>
- 10- Malakouti, S. M. (2023). Estimating the output power and wind speed with ML methods: A case study in Texas. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100324>
- 11- roy-billinton-transmission-system-reliability. (n.d.).
- 12- Sulaeman, S., Benidris, M., Mitra, J., & Singh, C. (2017). A Wind Farm Reliability Model Considering Both Wind Variability and Turbine Forced Outages. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 629–637. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2614245>
- 13- Tavner, P. J., Xiang, J., & Spinato, F. (2007). Reliability analysis for wind turbines. *Wind Energy*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/we.204>
- 14- Wang, B., Wang, X., Wang, X., Shao, C., & Liu, S. (2016). Reliability evaluation of voltage-source converter-based multi-terminal direct current integrated offshore wind plants. *IET Renewable Power Generation*, 10(6), 761–766. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0450>

- 15- Wang, J., Han, X., Song, T., & Jia, Y. (2021). Reliability Assessment of Wind Farm with Wind Turbine Gearbox Fatigue. *5th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Energy Internet for Carbon Neutrality, EI2 2021*, 2706–2711.
<https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713075>
- 16- Wen, J., Zheng, Y., & Donghan, F. (2009). A review on reliability assessment for wind power. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 13, Issue 9, pp. 2485–2494).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.006>

الزامات اخلاقی نگارش مقاله

نویسنده کننده مقاله آقای محمدمهدی نصیری متعهد می‌شود:

- مقاله ارسالی حاصل کار پژوهشی ایشان (و همکاران) بوده و در مواردی که از دستاوردهای تحقیقاتی دیگران استفاده شده، مطابق ضوابط و رویه معمول، مشخصات منابع مورد استفاده درج شده است.
- مقاله ارسالی (یا ترجمه آن) و مقاله‌ای با همپوشانی قابل توجه با این مقاله قبلاً در هیچ مجله و یا کنفرانسی ارائه نشده و به طور همزمان نیز در حال ارزیابی در مجله یا کنفرانس دیگری نیست.
- همه نویسندگان مقاله از کلیه محتویات علمی و نیز ترتیب قرارگیری نام و مشخصات و وابستگی شغلی خود در مقاله آگاهی و رضایت کامل دارند.
- چنانچه هر زمان خلاف موارد فوق و یا بروز هرگونه تقلب یا تخلف پژوهشی در رابطه با این مقاله اثبات شود، عواقب ناشی از آن متوجه نویسنده مقاله است و دبیرخانه کنفرانس مجاز است با ایشان (و همکاران) مطابق با ضوابط و مقررات رفتار نموده و هیچ‌گونه ادعایی قابل قبول نخواهد بود.



محل امضا