

## تحلیل علل ریشه‌ای خرابی جعبه‌دنده سیاره‌ای توربین بادی

ایرج هرسینی<sup>۱</sup>، علی حاجی‌زاده نمین<sup>۲</sup> و\*<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج

\*مسئول مکاتبات: a.hajyzadeh@gmail.com

## چکیده

## واژگان کلیدی

جعبه‌دنده توربین بادی  
FMEA  
RPN  
چرخ‌دنده  
FTA

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

توربین بادی مجموعه‌ای پیچیده از سیستم‌های الکترومکانیکی است که انرژی جنبشی باد را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. امروزه استفاده از توربین‌های بادی بسیار شایع است و این توربین‌ها بیشتر در محیط‌های بسیار نامساعد فعال هستند و در معرض انواع خرابی‌ها قرار می‌گیرند. طبق تحقیقات صورت گرفته، جعبه‌دنده سیاره‌ای توربین بادی سهم بسزایی در از کارافتادگی آن دارد و این در حالیست که تاکنون شمار اندکی از محققان به بررسی خرابی‌های جعبه‌دنده توربین بادی و علل ریشه‌ای این خرابی‌ها پرداخته‌اند. در این مقاله، ابتدا خرابی‌های مختلف جعبه‌دنده توربین بادی بوسیله عملیات میدانی جمع‌آوری شده و تحلیل حالات خرابی و اثرات آنها (FMEA) صورت گرفته است. سپس، با بهره‌گیری از استاندارد MIL-STD-1629A و معیار عدد اولویت ریسک (RPN) به تشخیص خرابی‌های اصلی و مهم این تجهیز پرداخته شده است؛ اصلی‌ترین خرابی‌های حاصل به ترتیب عبارتند از: وجود ترک در چرخ‌دنده خورشیدی (پینیون)، سایش دندانه‌های چرخ‌دنده خورشیدی (پینیون) و ارتعاشات غیر عادی بیرینگ چرخ‌دنده خورشیدی (پینیون) مرحله سوم. نهایتاً، تحلیل درخت عیب (FTA) برای خرابی اصلی ارائه شده است تا بدین ترتیب بتوان علل این خرابی را ریشه‌یابی نموده و گامی مفید و مؤثر در جهت کاهش و یا حذف علل آن در تحقیقات آتی برداشت.

## ۱ مقدمه

از اوایل سال ۱۹۸۰ بود که استفاده از انرژی بادی در جهان فراگیر شد. امروزه استفاده از توربین‌های بادی بسیار شایع شده اما نکته‌ای که شایان ذکر می‌باشد این است که اگر قرار باشد که این انرژی توانایی رقابت با سایر منابع انرژی را داشته باشد می‌بایست امکان استفاده، قابلیت اطمینان و عمر توربین‌های بادی نسبت به آنچه در گذشته بوده افزایش یابد [۱].

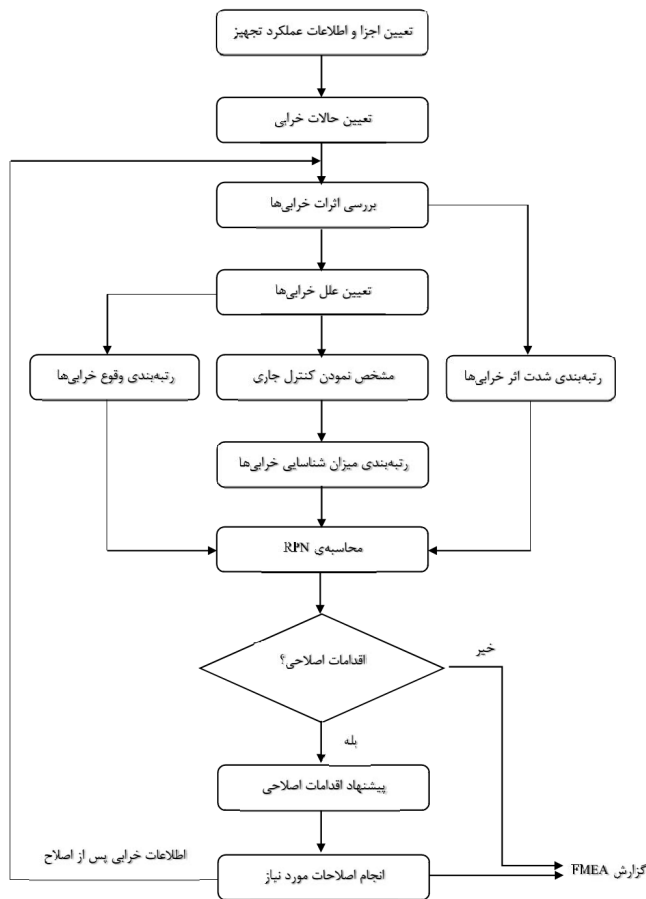
توربین بادی مجموعه‌ای پیچیده از سیستم‌های الکترومکانیکی است که انرژی جنبشی باد را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. اکثر توربین‌های بادی سه پره دارند که با باد به حرکت در آورده می‌شوند. این حرکت توسط هاب<sup>۱</sup> به شفت اصلی و از آن به جعبه‌دنده انتقال داده می‌شود. سپس، شفت سرعت بالا که از جعبه‌دنده خارج شده و سرعتی تا حدود ۱۲۰۰ دور در دقیقه را دارا می‌باشد، این دور را به ژنراتور انتقال داده و سبب تولید برق می‌گردد [۲].

توربین‌های بادی بیشتر در محیط‌هایی کار می‌کنند که دمای محیط، فشار هوا و سرعت باد به طور ناگهانی تغییر می‌کند و به همین دلیل این تجهیزات در معرض انواع خرابی‌ها قرار می‌گیرند که یکی از مهم‌ترین خرابی‌ها، خرابی جعبه‌دنده است. جعبه‌دنده‌های سیاره‌ای به علت داشتن توان انتقال بالا در یک فضای کوچک، در توربین‌های بادی به طور گسترده استفاده می‌شوند و به دلیل عوامل محیطی چون تندباد، خوردگی، گرد و خاک و اعمال بار زیاد

به صورت ناگهانی در توربین‌های بادی، در معرض خرابی قرار می‌گیرند؛ این خرابی بسیار زیان‌بار است و سبب می‌گردد تا کل سیستم از کار بیفتد [۳].

یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها به منظور یافتن عیوب اصلی در یک تجهیز، روش تحلیل حالات خطا و اثرات آنها<sup>۲</sup> (FMEA) است. در سال ۲۰۰۵ چن یو و همکارانش به شناسایی هوشمند عیوب به کمک تحلیل درخت عیب<sup>۳</sup> (FTA) پرداختند [۴]. در سال ۲۰۰۸ چاری و همکارانش یک مدل تحلیلی از چرخ‌دنده ارائه نمودند و به بررسی تغییرات سختی چرخ‌دنده‌های دارای ترک پرداختند [۵]. در سال ۲۰۰۹ بن دایا و همکارانش در کتابی تحت عنوان مدیریت و مهندسی نگهداری انواع روش‌های نگهداری و تعمیرات را بررسی نمودند [۶]. در سال ۲۰۱۰ حسین آبادی و همکارانش به تحلیل عیوب توربین بادی به روش FMEA پرداختند که در تحقیق آنها، جعبه‌دنده با دارا بودن عدد اولویت ریسک<sup>۴</sup> (RPN) نسبتاً بالایی جزو عیوب اصلی آنها شناخته شد [۷]. در همین سال، پی جی تاوئر و همکارانش با توجه به اینکه روش FMEA بر مبنای عدد اولویت ریسک، پتانسیل افزایش قابلیت اطمینان توربین‌های بادی به ویژه توربین‌های بادی دور از ساحل را دارد، این روش را برای بررسی نقاط ضعف طراحی توربین‌های بادی ۲ مگاواتی با ۳ نوع سیستم انتقال توان گوناگون به کار بردند تا میزان هزینه نگهداری و تعمیرات این تجهیز حداقل گردد [۸]. در سال ۲۰۱۱ داس و همکارانش نیز با استفاده از همین روش، به بررسی خرابی‌های اجزای توربین بادی پرداختند و دریافتند که جعبه‌دنده

<sup>۱</sup>hub<sup>۲</sup>Failure Modes and Effect Analysis<sup>۳</sup>Fault Tree Analysis<sup>۴</sup>Risk Priority Number



شکل ۱: فرآیند FMEA

شدت اثر عبارت است از میزان حاد بودن اثر خرابی بر سیستم و یا مشتری. احتمال وقوع تخمینی است از میزان رخداد علت خرابی در طی زمان طول عمر محصول و به بیان دیگر نشان می‌دهد که با چه احتمالی، حالت خرابی ناشی از علت شناسایی شده رخ می‌دهد. احتمال تشخیص نیز شانس شناسایی و کشف خرابی یا علت خرابی را توسط کنترل‌های جاری نشان می‌دهد و در واقع بیانگر قابلیت و توانایی کنترل‌های جاری در یافتن خرابی (یا علت خرابی) است [۱۳]. برای تعیین جداول و رتبه‌بندی هر کدام از این سه عامل در هر سیستم و یا تجهیز می‌بایست معیار مناسب انتخاب گردد که این اقدام، مرحله اول اجرای FMEA می‌باشد. در این مقاله، از استاندارد MIL-STD-1629A با اعمال یکسری اصلاحات به منظور تطابق با سیستم جعبه‌دنده توربین بادی استفاده شده است. این استاندارد توسط وزارت دفاع آمریکا در سال ۱۹۸۰ طراحی گشته و تا به امروز که بیش از سی سال از عمر آن می‌گذرد، نواقص آن برطرف شده و تکمیل گشته است.

به دلیل اینکه تحقیق ما بر روی جعبه توربین بادی صورت گرفته، استاندارد مورد نظر اصلاح شده است. رتبه‌بندی اصلاح‌شده شدت اثر در جدول ۱ آورده شده است؛ اقدام اصلاحی صورت‌گرفته در این رتبه‌بندی تنها در قسمت ضوابط و معیارها صورت گرفته تا به سیستم جعبه‌دنده توربین بادی تأکید گردد، اما اعداد رتبه‌بندی همان اعداد ۱ تا ۴ موجود در استاندارد است. رتبه‌بندی اصلاح‌شده برای احتمال وقوع در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول، سطح B استاندارد [۷] با توجه به وجود سطوح A و C حذف

با دارا بودن بیشترین عدد اولویت ریسک، بحرانی‌ترین زیرمجموعه توربین بادی محسوب می‌شود [۹]. در سال ۲۰۱۲ گارسیا مارکز و همکارانش انواع روش‌های متداول عیب‌یابی و پایش وضعیت قسمت‌های مختلف توربین بادی بررسی کردند [۱۰] و در همین سال ژو لینگ و همکارانش نیز علل ریشه‌ای خرابی جعبه‌دنده توربین بادی را با استفاده از روش FTA استخراج نمودند [۱۱]. در سال ۲۰۱۴ محمود شافه‌ای و همکارش به بررسی نقاط ضعف روش FMEA بر مبنای RPN در توربین‌های بادی پرداخته و با توسعه یک مدل ریاضی برای میزان ریسک و حالات خرابی توربین‌های بادی و ترکیب آن با روش سنتی FMEA، نقاط ضعف آن را به حداقل رساندند و در نهایت با مقایسه عددی روش قدیمی با روش جدید، تشابهات و اختلافات نتایج این دو روش را ارائه کردند [۱۲].

در این مقاله، داده‌های مربوط به خرابی‌های متداول در جعبه‌دنده سیاره‌ای توربین بادی ۶۶۰ مگاواتی به کمک عملیات میدانی از طریق پرسشنامه، مطالعه، تحقیق و همچنین نظرسنجی از کارشناسان نگهداری و تعمیرات بررسی می‌شود. سپس با استفاده از روش FMEA و معیار RPN خرابی‌های اصلی بدست آمده و در نهایت به تحلیل علل ریشه‌ای خرابی چرخ‌دنده (به کمک FTA) که مهم‌ترین جزء جعبه‌دنده می‌باشد، پرداخته می‌شود.

## ۲ توضیح روش

### ۱.۲ آنالیز حالات خرابی و اثرات آن (FMEA)

علل بوجود آورنده خرابی‌ها و اثرات ناشی از رخداد خرابی‌ها بوسیله روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آنها پیش‌بینی می‌شود و قابلیت اطمینان و ایمنی محصول افزایش می‌یابد. در روش FMEA ابتدا تمامی اجزای یک سیستم در نظر گرفته می‌شوند و حالات پتانسیل خرابی هر کدام از اجزا تعیین می‌گردد. سپس، شدت اثر و علل هر کدام از خرابی‌ها بر روی عملکرد سیستم توسط RPN که یک شاخص برای اولویت بندی حالات خرابی است، محاسبه و رتبه‌بندی می‌گردد. RPN حاصلضرب سه عدد رتبه شدت اثر<sup>۵</sup> (S)، رتبه احتمال وقوع<sup>۶</sup> (O) و رتبه احتمال تشخیص<sup>۷</sup> (D) است (فرآیند FMEA در شکل ۱ نشان داده شده است):

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

شایان ذکر است که این عدد به تنهایی معنا ندارد، بلکه در مقایسه با اعداد اولویت ریسک دیگر معنا پیدا می‌کند. هرچه این عدد مقدار بیشتری داشته باشد، حالت خرابی متناظر با آن مهم‌تر و بحرانی‌تر خواهد بود [۱۳]. پس از محاسبه RPN خرابی‌های مهم و اصلی مشخص می‌گردد که می‌بایست عملیات اصلاحی و پیشگیری‌کننده به منظور رفع یا کاهش این خرابی‌ها بررسی و در صورت امکان اعمال شود؛ این اصلاحات در جهت کاهش یا حذف علل ریشه‌ای خرابی، کاهش شدت اثر خرابی، افزایش میزان رضایت و استفاده از قطعه یا محصول صورت گیرد. پس از انجام اصلاحات، اطلاعات خرابی سیستم استخراج شده و RPN مجدداً محاسبه می‌گردد.

<sup>5</sup>severity <sup>6</sup>occurrence <sup>7</sup>detection

تأثیری روی متغیرهای پایش وضعیت کل سیستم دارد. هر دو این موارد تأثیر شایانی روی دقت مدل ارائه شده دارند [۸].

در مدل درخت عیب از علائم مختلفی استفاده می‌گردد؛ حادثه اشتباه پایه<sup>۸</sup> با دایره نشان داده می‌شود. حادثه‌ای اشتباه که از ترکیب حوادث اشتباهی که به طریق یک درگاه منطقی وارد می‌شوند، حاصل می‌شود با مستطیل نمایان می‌گردد. چنانچه یک خروجی اشتباه در صورتی رخ دهد که حداقل یک مورد از ورودی‌های اشتباه اتفاق بیفتد، از عبارت منطقی «یا» استفاده می‌شود. همچنین اگر یک خروجی اشتباه تنها در صورتی رخ دهد که تمام ورودی‌های اشتباه اتفاق بیفتد، عبارت منطقی «و» به کار گرفته می‌شود.

### ۳ مطالعه موردی

توربین‌های بادی که در ایران نصب شده‌اند، دارای ظرفیت‌های مختلفی هستند که عبارتند از: ۳۰۰ کیلووات، ۵۰۰ کیلووات، ۵۵۰ کیلو وات، ۶۰۰ کیلو وات، ۶۶۰ کیلووات، ۱/۵ مگاوات و ۲/۵ مگاوات. نزدیک به ۷۳ درصد این توربین‌ها را توربین‌های بادی ۶۶۰ کیلوواتی تشکیل می‌دهند. به همین علت در این تحقیق، تحلیل علل ریشه‌ای بر روی جعبه‌دنده این توربین‌ها صورت گرفته است. به منظور انجام این تحلیل، آمار خرابی‌های جعبه‌دنده توربین‌های بادی مورد نظر از سه شرکت جمع‌آوری شده است، که به عنوان ورودی‌های این تحلیل هستند. این داده‌ها که از واحدهای نگهداری و تعمیرات توربین‌های بادی به طریق تهیه پرسش‌نامه و نظرسنجی از کارشناسان خبره این حوزه و نیز مطالعه و بررسی تحقیقات گذشته بدست آمده است، مربوط به سال ۱۳۸۳ و سال‌های پس از آن می‌باشد. تعداد این خرابی‌های متداول که عموماً ثبت شده‌اند، مجموعاً ۱۵ عدد خرابی است.

خرابی‌های جعبه‌دنده توربین بادی را می‌توان به سه گروه خرابی‌های مربوط به چرخ‌دنده‌ها، رولر بیرینگ‌ها و روغن جعبه‌دنده دسته‌بندی نمود که در این مقاله بیشتر به تحلیل و بررسی خرابی‌های چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده توربین بادی پرداخته می‌شود:

- **خرابی چرخ‌دنده‌ها:** ۱- سایش، ۲- خستگی سطح، ۳- جریان پلاستیک، ۴- شکست، ۵- نارسایی‌های مربوط به چرخ‌دنده.
- **خرابی رولر بیرینگ‌ها:** ۱- سایش، ۲- گیرپاژ، ۳- ایجاد حفره<sup>۹</sup> ۴- خزش، ۵- تغییر رنگ، ۶- زنگ‌زدگی قفسه رولر بیرینگ.
- **خرابی روغن:** ۱- افزایش ذرات فرسایشی، ۲- کاهش ذرات افزودنی، ۳- وجود ذرات خارجی در روغن، ۴- گرمای بیش از حد روغن، ۵- نازک شدن فیلم روغن.

### ۴ نتایج و بحث بر روی آنها

#### ۱.۴ نتایج تحلیل حالات خرابی و اثرات آنها (FMEA) و معیار عدد اولویت ریسک (RPN)

خرابی‌های متداول جعبه‌دنده توربین بادی و نیز علل و اثرات هر یک بر روی عملکرد توربین بادی بر اساس نتایج FMEA به شرح ذیل می‌باشد:

شده است، تا بتوان سطوح A، B و C را به راحتی از یکدیگر متمایز کرد. اعداد مربوط به سطوح شناسایی عیب با حذف اعداد ۲، ۳، ۵، ۶ و ۸ به علت وجود چهار عدد باقی‌مانده کاهش یافته تا برای مطالعه روی جعبه‌دنده توربین بادی، سطوح شناسایی مختلف متمایز باشند. رتبه‌بندی اصلاح شده برای میزان شناسایی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱: رتبه‌بندی اصلاح‌شده شدت اثر

مقیاس عددی	توضیح	معیارها و ضوابط
۱	دسته چهار (کم)	انرژی الکتریکی تولید می‌شود اما جعبه‌دنده نیاز به تعمیر فوری دارد
۲	دسته سه (متوسط)	کاهش تولید انرژی الکتریکی
۳	دسته دو (خطرناک)	از دست رفتن قابلیت تولید انرژی الکتریکی
۴	دسته یک (فاجعه‌بار)	خسارت مهلک به کل سیستم جعبه‌دنده توربین بادی

جدول ۲: رتبه‌بندی اصلاح‌شده احتمال وقوع

مقیاس عددی	توضیح	معیارها و ضوابط
۱	سطح E (به شدت غیرمحمول)	احتمال وقوع یک حالت خرابی کمتر از ۰/۰۰۱ است.
۲	سطح D (بعید)	احتمال وقوع یک حالت خرابی بیشتر از ۰/۰۰۱ و کمتر از ۰/۰۱ است.
۳	سطح C (گاهی اوقات)	احتمال وقوع یک حالت خرابی بیشتر از ۰/۰۱ و کمتر از ۰/۱ است.
۵	سطح A (مکرر)	احتمال وقوع یک حالت خرابی بیشتر از ۰/۱ است.

جدول ۳: رتبه‌بندی اصلاح‌شده میزان شناسایی

مقیاس عددی	توضیح	معیارها و ضوابط
۱	تقریباً معلوم	روش پایش مورد استفاده اغلب اوقات توانایی شناسایی عیب را دارد.
۴	زیاد	روش پایش مورد استفاده گاهی اوقات توانایی شناسایی عیب را دارد.
۷	کم	روش پایش مورد استفاده تقریباً توانایی شناسایی عیب را ندارد.
۱۰	تقریباً غیرممکن	هیچ روش پایشی توانایی شناسایی عیب را ندارد.

همان گونه که از اعداد ارائه شده در جداول مشخص است، می‌توان نتیجه گرفت که کمینه RPN محاسبه شده برای جعبه‌دنده توربین بادی عدد ۱ بوده و بیشینه آن عدد ۲۰۰ می‌باشد.

#### ۲.۲ آنالیز درخت عیب (FTA)

یکی از محبوب‌ترین روش‌هایی که بصورت دیگرامی تمام دلایلی را که ممکن است منجر به بروز خرابی شوند، به طور تفصیلی توضیح می‌دهد، روش تحلیل درخت عیب است. همچنین این روش سبب می‌شود اهمیت هر یک از دلایل اولیه‌ای که ممکن است موجب بروز عیب شوند، مشخص گردد تا بتوان یک برنامه‌ریزی دقیق برای انجام امور نگهداری پیشگیرانه بخصوص با توجه به شرایط غیر قابل پیش‌بینی محیطی انجام داد. تمامی این پردازش‌ها شامل دو بخش اصلی می‌باشد: انتخاب داده‌های مورد نیاز برای پایش وضعیت جهت تجزیه و تحلیل از بین تعداد بیشماری داده و اینکه هر یک از این داده‌ها چه

<sup>8</sup>basic event <sup>9</sup>pitting

بگیرند، دندان کمتر مستعد شکست بوده و ظرفیت تحمل بار بیشتری خواهد داشت.

۳. **ارتعاشات غیرعادی رولر بیرینگ:** از جمله عواملی که موجب ارتعاشات غیر عادی رولر بیرینگ می‌گردد، شامل مقدار بار بیش از حد پیش‌بینی شده، روان‌کاری نامناسب، پوسته پوسته شدن سطح شیار غلتک، سایش، پیدایش حفره بر روی شیار غلتک و غیره می‌باشد. از جمله اقدامات اصلاحی به منظور کاهش یا حذف این خرابی می‌توان به کنترل مدام بار غیرعادی، بهبود روش روان‌کاری جهت حصول اطمینان از تشکیل لایه روان‌کار به طریق افزایش ویسکوزیته، استفاده از بیرینگ با قدرت تحمل بار بیشتر، تصفیه روغن و غیره اشاره نمود. در صورت ارتعاش غیرعادی رولر بیرینگ علاوه بر اینکه دمای روغن افزایش می‌یابد، سبب افزایش صدای جعبه‌دنده نیز می‌گردد.

۴. **افزایش عناصر فرسایشی در روغن:** روغن شامل عناصر فرسایشی و افزایشی می‌باشد که با افزایش میزان ساعات کارکرد آن، ذرات فرسایشی افزایش و ذرات افزایشی کاهش می‌یابند. این عامل باعث صدمه به قسمت‌هایی که با روغن در تماس‌اند، می‌گردد. برای جلوگیری از افزایش ذرات فرسایشی باید آنالیز روغن طبق زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات صورت پذیرد تا میزان ذرات فرسایشی مشخص و در صورت لزوم، اقدام اصلاحی (یعنی تعویض روغن) انجام شود.

۵. **وجود ذرات خارجی در روغن وجود ذرات خارجی در روغن، ناشی از عدم وجود سیستم فیلترینگ مناسب روغن بوده و سبب صدمه زدن به اجزای در ارتباط با روغن و کاهش عمر روغن می‌گردد.** از جمله اقدامات اصلاحی در برابر وجود این ذرات، قرار دادن یک آهنربا در جعبه‌دنده و تعویض فیلتر روغن می‌باشد.

۶. **گرمای بیش از حد مجاز روغن:** سایش شدید و ارتعاش زیاد بین اعضای جعبه‌دنده سبب می‌گردد تا دمای روغن بیش از حد مجاز بالا رود و این امر باعث می‌شود که روغن لزجت خود را از دست داده و توانایی روان‌سازی لازم را نداشته باشد. به منظور جلوگیری از این امر می‌بایست علاوه بر انتخاب روغن با لزجت بالاتر، درگیری چرخ‌دنده‌ها و چرخش یاتاقان‌ها نیز جهت اطمینان از عدم بروز عیب سایش شدید و ارتعاش زیاد مورد بررسی قرار گیرند.

۷. **خوردگی رولر بیرینگ:** خوردگی به پدیده اکسیداسیون یا تجزیه در اثر فعل و انفعال شیمیایی با یک اسید یا باز گفته می‌شود. خوردگی زمانی اتفاق می‌افتد که آب به داخل بیرینگ نفوذ کند و یا ترکیبات کلرین یا سولفور موجود در مواد افزودنی روان‌کار تحت دمای زیاد تجزیه شود. اقدامات متقابلی که می‌توان در قبال رخداد این خرابی انجام داد تقویت سیستم آب‌بندی و بازرسی منظم روان‌کار می‌باشد. در صورت خوردگی رولر بیرینگ، میزان ارتعاشات آن افزایش یافته و توانایی حرکت چرخشی آن کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از معیار RPN برای خرابی‌های مختلف جعبه‌دنده توربین بادی در جدول ۴ ارائه شده است. رتبه شدت اثر، احتمال وقوع و میزان شناسایی

۱. **سایش دندانه چرخ‌دنده:** سایش عبارتست از زدوده شدن یکنواخت یا غیر یکنواخت فلز از روی سطح دندانه. علل اصلی سایش دندانه، تماس فلز به علت نامناسب بودن ضخامت لایه روغن، ذرات ساینده موجود در روغن که با شکستن لایه روغن باعث سایش سریع یا ایجاد خراش می‌گردد و سایش شیمیایی به علت ترکیب روغن و مواد افزوده شده به آن می‌باشد. سایش باعث کاهش ضخامت دندانه و تغییر شکل پروفیل آن می‌شود و در نتیجه شکل پروفیل دندانه از حالت مطلوب (مثلاً منحنی اینولوت) خارج شده و خواص آن از بین می‌رود. سایش بخصوص در چرخ‌دنده‌هایی که باید برای مدت نامحدود با سرعت بالا کار کنند یک پدیده بسیار مهم است. البته سایش همیشه یک عامل منفی نیست بلکه وجود مقدار بسیار ظرفیتی سایش باعث اصلاح دندانه‌های درگیر با هم و هماهنگ شدن آنها می‌شود. از روش‌های جلوگیری از سایش می‌توان افزایش ویسکوزیته روغن، افزایش سختی چرخ‌دنده، پرداخت خوب سطح دندانه و در بعضی مواقع اصلاح پروفیل دندانه و تاج‌گذاری دندانه<sup>۱۵</sup> (در این روش وسط دندانه به صورت یک برآمدگی، بالا می‌آید و بدین ترتیب بیشتر بار توسط این قسمت منتقل می‌شود) را نام برد.

۲. **شکست/ترک دندانه:** شکست دندانه چرخ‌دنده، شکستی است که در آن تمام یا قسمت قابل توجهی از یک دندانه بر اثر نقص‌های ساختاری ناشی از عملیات آهنگری، بارگذاری بیش از حد، ضربه و یا اغلب بر اثر تنش‌های خمشی مکرری که بیش از مقدار حد دوام ماده چرخ‌دنده است، از چرخ‌دنده جدا می‌شود. این نوع شکست، حاصل خستگی خمشی دندانه تحت بار خمشی وارد بر آن می‌باشد. در صورت شکسته شدن دندانه، درگیری چرخ‌دنده‌ها با هم کاهش یافته و توانایی انتقال توان کمتری خواهند داشت. شکست دندانه به چند صورت رخ می‌دهد:

- در طول زمانی که ترک در حال رشد است روغن به درون آن نفوذ کرده و هر گاه دندانه درگیر می‌شود، فشار هیدرولیکی زیادی تولید می‌کند که این فشار باعث تخریب و اشاعه ترک به زیر سطح دندانه چرخ‌دنده می‌شود.

- اگر شکست دندانه به علت بارگذاری بیش از حد مجاز و یا بر اثر ضربه، رخ داده باشد معمولاً سطح شکسته شده به صورت ریش‌ریش است، حتی اگر دندانه کاملاً سخت شده باشد. با این حال سطح شکست شبیه رشته‌های یک ماده پلاستیکی است که جدا جدا پیچانده شده‌اند.

- گاهی اوقات نیز انطباق تداخلی ناخواسته‌ای که بین دندانه‌های درگیر رخ می‌دهد و یا تنش‌های پسماند عملیات حرارتی باعث می‌شود که شکست در ناحیه ریشه در وسط دو دندانه آغاز شود. برای جلوگیری از شکست، می‌توان فیلتهای ریشه دندانه را ساجمه‌زنی و صیقلی نمود. همچنین اگر مواد سازنده چرخ‌دنده تحت عملیات حرارتی به منظور به حداقل رساندن تنش‌های پسماند قرار

وارد گردد. در این مقاله، هدف اولیه از تحقیق صورت گرفته پیدا کردن عیوب اصلی و مهم و نهایتاً یافتن علل ریشه‌ای آنها در جعبه‌دنده توربین‌های بادی ۶۶۰ مگاواتی بوده است. با بهره‌مندی از روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آنها (FMEA) به همراه معیار عدد اولویت ریسک (RPN)، مهم‌ترین و اصلی‌ترین خرابی‌ها به ترتیب عبارتند از وجود ترک در چرخ‌دنده خورشید (پینیون)، سایش دندانه‌های چرخ‌دنده خورشید (پینیون) و ارتعاشات غیر عادی رولر بیرینگ چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله سوم. این نتایج حاکی از آن است که خرابی‌های مربوط به چرخ‌دنده، از جمله خرابی‌های اصلی و بحرانی در سیستم جعبه‌دنده توربین بادی می‌باشد. لذا در مرحله بعدی تحقیق، با بهره‌گیری از روش FTA، علل ریشه‌ای خرابی چرخ‌دنده بررسی شدند که نتایج این تحلیل نشان داد پنج عامل اصلی خرابی، سایش، خستگی سطح، جریان پلاستیک، شکست و نارسایی‌های مربوط به چرخ‌دنده هستند. با بررسی سطوح پایین‌تر نمودار FTA مربوط به خرابی چرخ‌دنده نیز مشخص شد که علل پایه‌ای خرابی‌ها شامل تنش‌های تماسی بسیار بالا، سرعت لغزشی پایین، نازک شدن فیلم روغن و لرزش شدید می‌باشد.

در نهایت، از جمله مسائل باقی‌مانده‌ای که در تحقیقات آتی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد می‌توان به انجام تحلیل آنالیز حالات خرابی و اثرات آنها بر روی سایر قسمت‌های توربین بادی از جمله ژنراتور و پره‌ها اشاره داشت. همچنین می‌توان با بهینه‌سازی و بازطراحی قسمت‌هایی از جعبه‌دنده توربین بادی که بیشترین میزان خرابی را به خود اختصاص داده‌اند، از هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات جعبه‌دنده کاست.

## تشکر و قدردانی

در پایان از شرکت صبا نیرو به جهت همکاری ایشان در حوزه نگهداری و تعمیرات توربین‌های بادی تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

برای هر خرابی، به ترتیب با توجه به جداول ۱ تا ۳ و همچنین نظرسنجی از کارشناسان واحد نگهداری و تعمیرات توربین‌های بادی بدست آمده است. همانطور که در این جدول مشخص است، اصلی‌ترین عواملی که منجر به خرابی جعبه‌دنده توربین بادی می‌گردد به ترتیب عبارتند از: وجود ترک در چرخ‌دنده خورشید (پینیون)، سایش دندانه‌های چرخ‌دنده خورشید (پینیون) و ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده خورشید (پینیون) در مرحله سوم. با استناد به این مهم که خرابی‌های اصلی و مهم غالباً مرتبط با چرخ‌دنده هستند و همچنین با توجه به اینکه چرخ‌دنده جزء اصلی جعبه‌دنده می‌باشد، علل ریشه‌ای خرابی این جز تحت بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲.۴ نتایج تحلیل درخت خطا (FTA)

در ابتدا قابل ذکر است که در رسم نمودار FTA برای خرابی چرخ‌دنده در جعبه‌دنده توربین بادی (شکل ۲) از مطالعات، تحقیقات و همچنین نظرات کارشناسان بخش نگهداری و تعمیرات توربین‌های بادی بهره گرفته شده است. با توجه به این شکل، در تحلیل علل ریشه‌ای خرابی چرخ‌دنده جعبه‌دنده توربین بادی، پنج عامل اصلی سایش، خستگی سطح، جریان پلاستیک، شکست و نارسایی‌های مربوط به چرخ‌دنده موجب این خرابی می‌گردد و این عوامل اصلی هر یک از علت‌های دیگری مانند ذرات ساینده روغن، نازک شدن فیلم روغن، تنش‌های تماسی بسیار بالا و بارگذاری سنگین ناشی می‌شوند. با توجه به خرابی‌های پایه‌ای استنتاج شده در این نمودار می‌توان این گونه قلمداد کرد که تنش‌های تماسی بسیار بالا یکی از عوامل بسیار شایع در خرابی چرخ‌دنده است و عواملی چون ناهم‌محوری، آلودگی روغن و ترک‌های ریز ناشی از عملیات حرارتی نیز در بروز خرابی چرخ‌دنده مؤثر هستند.

## ۵ نتیجه‌گیری

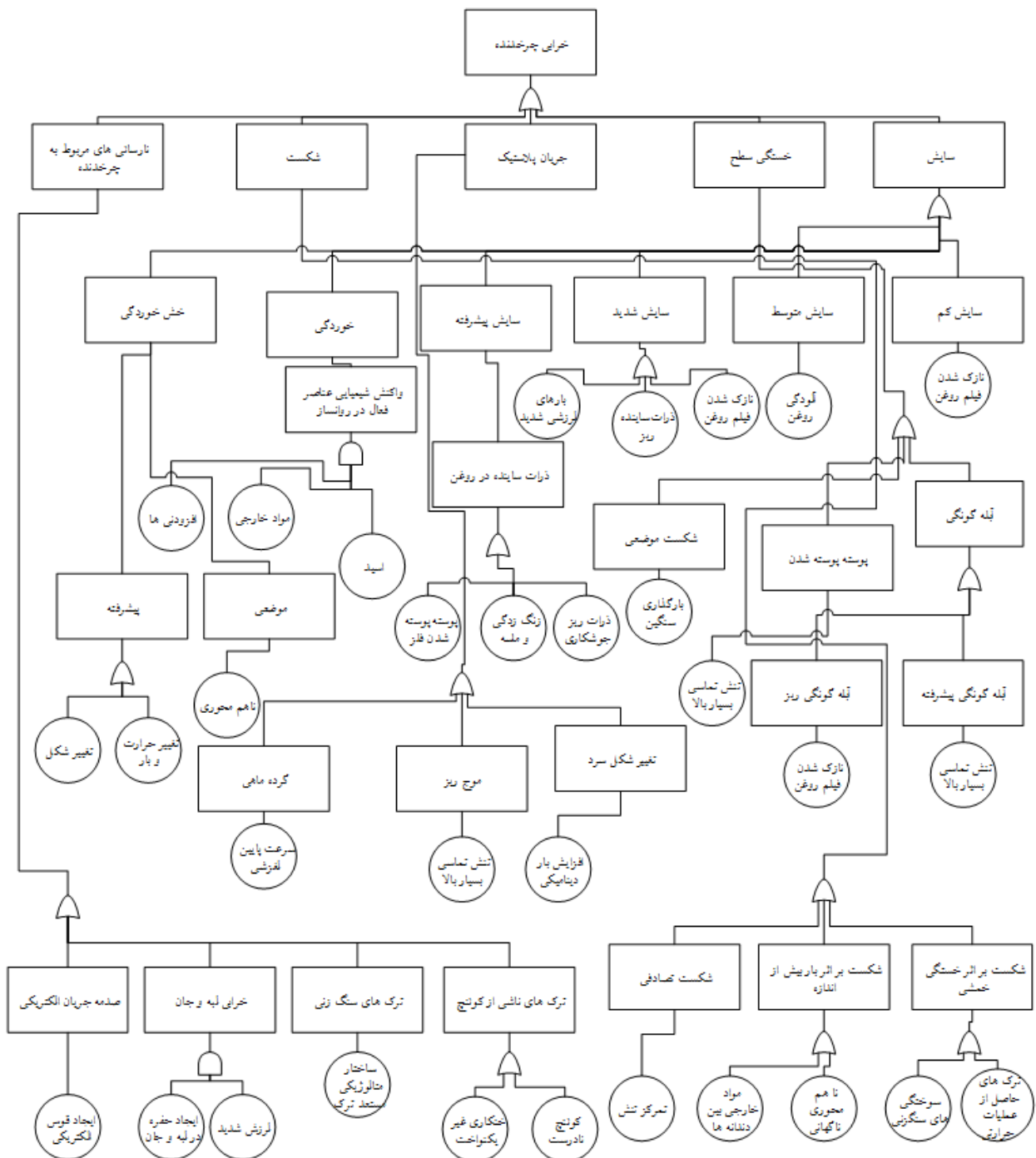
بهره‌گیری از برنامه‌های نگهداری و تعمیرات سبب می‌گردد تا از خرابی کلی سیستم جلوگیری شده و همچنین از نظر مالی نیز ضرر بسیار کمتری به سیستم

جدول ۴: نتایج RPN

ردیف	نام اجزا	رتبه شدت اثر	رتبه میزان شناسایی	رتبه احتمال وقوع	RPN
۱	وجود ترک در چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله سوم	۴	۷	۵	۱۴۰
۲	سایش دندانه‌های چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله سوم	۳	۷	۵	۱۰۵
۳	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله سوم	۴	۴	۵	۸۰
۴	سایش دندانه‌های چرخ‌دنده سیاره مرحله سوم	۳	۷	۳	۶۳
۵	وجود ترک در چرخ‌دنده سیاره مرحله سوم	۳	۷	۳	۶۳
۶	سایش دندانه‌های چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله اول	۳	۷	۳	۶۳
۷	وجود ترک در چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله اول	۳	۷	۳	۶۳
۸	سایش دندانه‌های چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله دوم	۳	۷	۳	۶۳
۹	وجود ترک در چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله دوم	۳	۷	۳	۶۳
۱۰	ارتعاشات غیرعادی رولر بیرینگ شفت سرعت متوسط	۳	۷	۳	۶۳
۱۱	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ‌های چرخ‌دنده‌های سیاره مرحله دوم	۴	۴	۳	۴۸
۱۲	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله اول	۴	۴	۳	۴۸
۱۳	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده خورشید (پینیون) مرحله دوم	۴	۴	۳	۴۸
۱۴	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده رینگ در مرحله دوم	۳	۷	۲	۴۲
۱۵	سایش دندانه‌های چرخ‌دنده‌های سیاره مرحله دوم	۲	۷	۳	۴۲
۱۶	وجود ترک در چرخ‌دنده رینگ در مرحله اول	۲	۱۰	۲	۴۰
۱۷	سایش دندانه‌های چرخ‌دنده رینگ در مرحله دوم	۲	۱۰	۲	۴۰
۱۸	وجود ترک در چرخ‌دنده رینگ در مرحله دوم	۲	۱۰	۲	۴۰

جدول ۵: ادامه جدول ۴.

RPN	رتبه احتمال وقوع	رتبه میزان شناسایی	رتبه شدت اثر	نام اجزا	ردیف
۳۶	۳	۴	۳	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده سیاره مرحله سوم	۱۹
۳۶	۳	۴	۳	افزایش عناصر فرسایشی در روغن جعبه‌دنده	۲۰
۳۲	۲	۴	۴	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ‌های چرخ‌دنده‌های سیاره مرحله اول	۲۱
۲۸	۲	۷	۲	سایش دندان‌های چرخ‌دنده‌های سیاره مرحله اول	۲۲
۲۸	۲	۷	۲	وجود ترک در چرخ‌دنده‌های سیاره مرحله اول	۲۳
۲۱	۱	۷	۳	ارتعاشات غیرعادی بیرینگ چرخ‌دنده رینگ در مرحله اول	۲۴
۲۱	۳	۷	۱	خوردگی رولر بیرینگ شفت سرعت متوسط	۲۵
۲۰	۵	۱	۴	ارتعاشات غیرعادی رولر بیرینگ شفت سرعت بالا	۲۶
۲۰	۱	۱۰	۲	سایش دندان‌های چرخ‌دنده رینگ در مرحله اول	۲۷
۱۵	۵	۱	۳	خوردگی رولر بیرینگ شفت سرعت بالا	۲۸
۶	۲	۱	۳	وجود ذرات خارجی در روغن جعبه‌دنده	۲۹
۳	۳	۱	۱	گرمای بیش از حد مجاز روغن جعبه‌دنده	۳۰



شکل ۲: تحلیل درخت خطا برای خرابی چرخ‌دنده در جعبه‌دنده توربین بادی

## مراجع

- [1] WWEA. World wind energy report 2014. Online, 2014.
- [2] McMillan, David and Ault, Graham W. Quantification of condition monitoring benefit for offshore wind turbines. *Wind Engineering*, 31(4):267-285, 2007.
- [3] Feng, Zhipeng and Liang, Ming. Fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions via adaptive optimal kernel time-frequency analysis. *Renewable Energy*, 66:468 – 477, 2014.
- [4] Xuejun, Z and Yu, CHENF. The research of intelligent fault diagnosing methods based on FTA. *Microcomputer Information*, 21(6):123-124, 2005.
- [5] Chaari, Fakher, Fakhfakh, Tahar, and Haddar, Mohamed. Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 28(3):461 – 468, 2009.
- [6] Ben-Daya, Mohamed, Ait-Kadi, Daoud, Duffuaa, Salih O, Knezevic, Jezdimir, and Raouf, Abdul. *Handbook of maintenance management and engineering*, vol. 7. Springer, 2009.
- [7] Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., and Tavner, P.J. Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(7):817 – 824, 2010.
- [8] Tavner, P.J., Higgins, A., Arabian, H., Long, H., and Feng, Y. Using an FMEA method to compare prospective wind turbine design reliabilities. in *European Wind Energy Conference , EWEC 2010*, vol. 4, pp. 2501 – 2537, 2010.
- [9] Das, M. K., Panja, S. C., Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., and Elombo, A. I. Expert-based fmea of wind turbine system. in *2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp. 1582-1585, Dec 2011.
- [10] Márquez, Fausto Pedro García, Tobias, Andrew Mark, Pérez, Jesús María Pinar, and Papaelias, Mayorkinos. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, 46:169 – 178, 2012.
- [11] Zhi-Ling, YANG, Bin, WANG, Xing-Hui, DONG, and Hao, LIU. Expert system of fault diagnosis for gear box in wind turbine. *Systems Engineering Procedia*, 4:189 – 195, 2012. Information Engineering and Complexity Science - Part II.
- [12] Shafiee, Mahmood and Dinmohammadi, Fateme. An FMEA-based risk assessment approach for wind turbine systems: A comparative study of onshore and offshore. *Energies*, 7(2):619-642, 2014.

[۱۳] کلانتری، مسعود. طراحی و ساخت سیستم عیب‌یاب آسانسورهای ساختمان به طریق پیش‌بینانه و بر اساس اصول مهندسی نگاهداشت و بازطراحی در آنالیز انواع خطا و تحلیل اثرات آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.