

اجرای پایش وضعیت در توربین‌های بادی جهت کاهش هزینه نگهداری و تعمیرات با استفاده از روش تحلیل اطلاعات اسکادا

امین اسکندرزاده ثابت

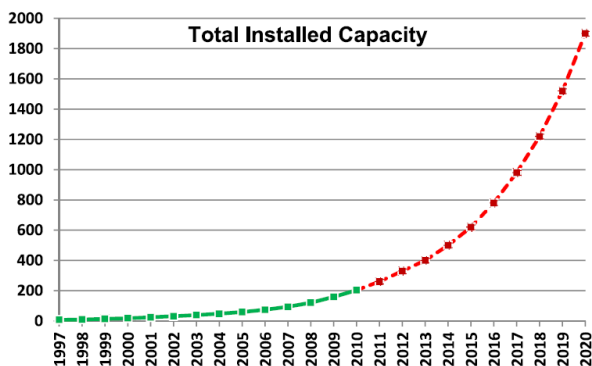
(نویسنده مسئول) کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مکانیک*

کامران ترکمان

کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم پزشکی، گروه مدیریت، torkamankamran@yahoo.com

چکیده: توربین‌های بادی یکی از منابع در حال رشد تولید انرژی در جهان امروز می‌باشند که پیوسته به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری نیاز دارند. پایش وضعیت یک ابزار برای تشخیص زودهنگام در جهت کاهش خرابی و افزایش بهره‌وری می‌باشد. در این مقاله به بررسی حالت‌های پایش وضعیت در توربین‌های بادی، استراتژی نگهداری و تعمیرات، روش‌های پردازش سیگنال، سیستم اسکادا و طراحی معیار خرابی سیستم تحت پایش وضعیت پرداخته ایم. هدف از این مقاله توسعه‌ی روش تفسیر اطلاعات جمع‌آوری شده توربین‌های بادی از طریق اسکادا با بهره‌گیری از علم پایش وضعیت که در گذشته به واسطه نبود ابزار تحلیلی مناسب مورد استفاده قرار نمی‌گرفت، می‌باشد. در واقع با تلفیق مراقبت وضعیت، تحلیل اطلاعات اسکادا و پردازش سیگنال یک روش جدید ارائه شده است، که به واسطه‌ی پایش تمامی اجزا مکانیکی و الکتریکی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کاهش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: تشخیص خرابی، پایش وضعیت، تعمیر و نگهداری، توربین‌های بادی، اسکادا



شکل (۱). پیش‌بینی استفاده از انرژی بادی

۱- مقدمه [1-11]

در شکل (۱) پیش‌بینی انجمن جهانی انرژی بادی مشاهده می‌گردد، در واقع میزان استفاده از فناوری باد تا سال ۲۰۲۰ به مقدار حدود ۱۹۰۰ واحد متمرکز در سطح جهان خواهد رسید که خود نشان دهنده استقبال از این فناوری پاک می‌باشد. برای گسترش این فناوری در رقابت با سایر، می‌بایست قابلیت اطمینان و عمر توربین‌ها بهبود یابد. استقبال از فناوری توربین بادی صرفاً با مدیریت هزینه‌ها امکان‌پذیر خواهد بود. به عنوان مثال در یک دوره ۲۰ ساله هزینه بهره‌برداری و نگهداری و تعمیرات یک توربین 750 KW معادل ۳۰-۲۵ درصد کل هزینه‌ها می‌باشد که کاهش این هزینه سبب استقبال روز افزون از این فناوری خواهد شد.

مطابق شکل (۲) میزان خرابی در توربین‌های بزرگ در مقایسه با رنج متوسط و کوچک بیشتر بوده و در نتیجه میزان هزینه نگهداری و تعمیرات آنها افزایش می‌یابد. در واقع کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در توربین‌های بزرگ از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد.

* (Corresponding author) st_a_ekandarzadeh@azad.ac.ir

بر اساس جهت محور چرخش تقسیم بندی می شوند:

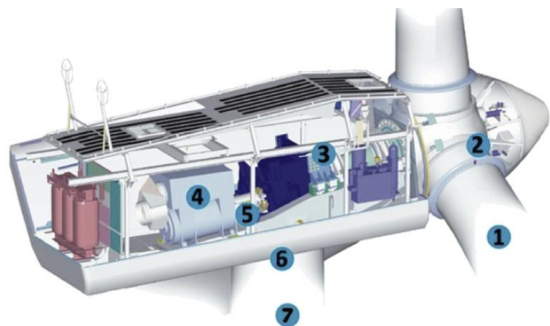
۱. محور افقی (Horizontal Axis Wind):

این نوع توربین (۳ تیغه) از نوع رایج مورد استفاده بوده (شکل (۳)) و ویژگی روتور توربین‌های محور افقی جدید بسیار شبیه ملخ هواپیما می باشد. جریان هوا روی مقطع ایرودینامیکی شکل پره ها حرکت می کند و نیروی لیفت را به وجود آورده که باعث چرخش روتور می گردد. ناسل (پوشش خارجی مجموعه گیربکس، یاتاقان ها، ژنراتور و سیستم دوران حول محور که روتور به آن متصل است) توربینهای محور افقی محلی برای گیربکس و ژنراتور می باشد. مساحتی که هر کدام از پره ها جاروب می کنند از فرمول زیر بدست می آید:

$$A = \pi r^2$$

۲. محور عمودی (Vertical Axis Wind Turbines):

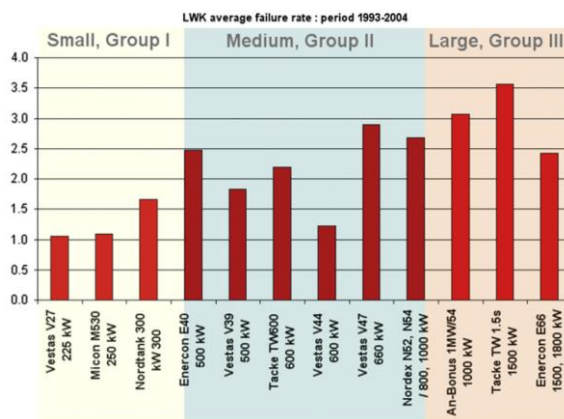
جریان هوا بر روی هر سطحی دو نوع نیروی ایرودینامیکی با نام های درگ و لیفت به وجود می آورد که نیروی درگ در جهت جریان باد است و نیروی لیفت عمود بر جریان باد می باشد. یکی از این نیروها یا هر دو می توانند نیروی مورد نیاز برای چرخش پره های توربین های بادی را تامین نمایند.



شکل (۳). قطعات اصلی توربین بادی. ۱. تیغه، ۲. روتور، ۳. گیربکس، ۴. ژنراتور، ۵. یاتاقان ها، ۶. سیستم Yaw، ۷. برج

۳- نگهداری و تعمیرات

یکی از مهم ترین مفاهیم مدیریت در صنایع بزرگ تعریف نگهداری و تعمیرات است. در واقع نگهداری و تعمیرات مجموعه ای از فعالیتها و عملکردها است که هر کدام با توجه به تعاریف خود، ماوریت عملیاتی نگهداشتن دستگاه ها، ماشین آلات و تجهیزات را دارند که باعث می گردند قابلیت عملیاتی آنها حفظ شود.



شکل (۲). میزان خرابی توربین ها

از آنجا که تعدادی از قطعات به صورت غیرمنتظره و زودتر مورد شکست قرار می گیرند استفاده از سیستم های پایش وضعیت (CM) جهت بهبود این وضع می بایست مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله تلفیق علم مراقبت وضعیت (آنالیز ارتعاشات، انتشار صوت، آنالیز روغن، ترموگرافی و...) با استفاده از روش تحلیل اطلاعات اسکادا و بهره گیری از روش پردازش سیگنال جهت از بین بردن نویزهای دریافتی در جهت تشخیص سریع خرابی های مکانیکی و الکتریکی قسمت های مختلف توربین های بادی ارائه گردیده است. از معدود تحقیقات انجام شده میتوان به موارد زیر اشاره نمود:

- Vachon در سال ۲۰۰۲ و Walford در سال ۲۰۰۶ هزینه نگهداری و تعمیرات، نرخ خرابیهای توربین های بادی را بررسی کردند.
- Tvaner و همکاران در سال ۲۰۰۸ قابلیت اطمینان توربین بادی و کاربرد آنها را بررسی کردند.
- Annon در سال ۲۰۰۵ و Marquez در سال ۲۰۱۲ کاهش هزینه ها با استفاده از مراقبت وضعیت را بررسی کردند.
- Yang در سال ۲۰۱۳، Zaher و همکاران در سال 2002 از روش تحلیل اطلاعات اسکادا در توربین های بادی استفاده نمودند.

همانطور که در بالا مشاهده می گردد تمامی مطالعات انجام شده به صورت موردی، تک بعدی و جزیره ای بوده و هیچکدام از محققین بر روی اجرای جامع مراقبت وضعیت در توربین های بادی با استفاده از روش تحلیل اطلاعات اسکادا و بهره گیری از پردازش سیگنال و لحاظ کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات مطالعاتی انجام نداده اند.

۲ - توربین های بادی [12-14]

توربین بادی جهت تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی به کار می رود که توان بادی نام دارد. اگرچه طراحی های مختلفی برای توربین بادی موجود می باشد ولی به طور عمده به دو دسته کلی

۴-۲ انتشار صوت

انتشار صوت یا آکوستیک امیشن (AE) پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده مافوق صوت رخ می‌دهد. بر همین اساس، پایش وضعیت به روش آکوستیک امیشن شامل دریافت سیگنال‌های منتشر شده در تجهیزات توسط سنسورهای مخصوص و برقراری ارتباط بین سیگنال‌های دریافتی و تغییرات ایجاد شده بر روی تجهیزات می‌باشد. این روش برای پایش وضعیت فرآیندهایی که در آن سیال با فشار بالا یا پدیده‌های فعال مکانیکی وجود دارد، مناسب می‌باشد. در این روش، سیگنال‌های فرکانس بالا توسط سنسورهای مخصوص ثبت شده و نتایج بصورت داده‌های عددی شامل پارامترهای دامنه و فرکانس سیگنال‌ها نمایش داده می‌شود. تغییرات این پارامترها در طول زمان به عنوان معیاری برای ارزیابی خرابی‌های احتمالی در تجهیزات مورد تحلیل قرار می‌گیرد، کاربرد این تکنیک در مانیتورینگ تیغه، گیربکس و یاتاقان‌ها می‌باشد.

۴-۳ تکنیک مافوق صوت

در این تست، امواج فراصوت که دامنه آنها بین ۰/۵ تا ۲۵ مگاهرتز هستند توسط یک مولد صوتی بر روی قطعه مورد آزمایش هدایت می‌شود. این امواج هنگامی که به ناپیوستگی‌ها و عیوب سطحی و زیر سطحی قطعه برخورد می‌کنند منعکس می‌شوند که توسط مولد صوتی این بازتاب‌ها دریافت گردیده و به پالس‌های الکتریکی تبدیل شده و در صفحه نمایش به صورت یک سیگنال ظاهر می‌گردد. اپراتور با بررسی این سیگنال‌ها می‌تواند به اطلاعات مختلفی از قبیل مکان، عمق، ابعاد و نوع عیب بر روی قطعه پی ببرد. این آزمون می‌تواند عیوب را تا عمق ۵ متر در فولاد‌ها نشان دهد و درصد نفوذ و حساسیت آن در آشکارسازی عیوب صفحه‌ای و بحرانی نسبت به آزمون رادیوگرافی بالاتر است. نیاز به تخصص و مهارت بالا در انجام دادن آزمون بر روی سازه‌ها و همچنین خواندن اطلاعات دریافتی از محدودیت‌های این تکنیک می‌باشد. در این روش قطعات بسیار کوچک و نازک و قطعات ناهموار به سختی قابل تست شدن هستند و اگر ناپیوستگی و عیب کوچک و بسیار نزدیک به سطح باشد ممکن است تشخیص داده نشود. کاربرد این تست در تشخیص خرابی (به خصوص خرابی داخلی) تیغه و برج توربین بادی می‌باشد.

۴-۴ آنالیز روغن

در این روش روغن و ذرات موجود در روغن پارامترهایی هستند که پایش می‌شوند. می‌توان این روش را مشابه آزمایش خون دانست که پزشکان به این طریق به وضعیت سلامتی انسان پی می‌برند. به همین ترتیب در این روش با آزمایش روغن می‌توان وضعیت روغن را که نقشی حیاتی برای بسیاری از تجهیزات دارد زیر نظر داشت. همچنین از جنس و شکل ذرات موجود در روغن می‌توان به عیب و

در اینجا منظور از نگهداری و تعمیرات، نت مبتنی بر پایش وضعیت می‌باشد که در واقع به مجری داده‌های آماری خوبی برای تعیین و پیش بینی احتمال وقوع یک خرابی در تجهیز را در آینده می‌دهد. بعد از تشخیص وقوع یک خرابی در تجهیز واحد نت می‌تواند فعالیت‌های تعمیراتی پیشگیرانه را روی تجهیز در یک زمان برنامه ریزی شده تبیین و اجرا کند. عمده فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه بروی پایش وضعیت (Condition Monitoring) متمرکز است تکنیک‌های آنالیز روغن (Oil Analysis)، ترموگرافی، ارتعاش سنجی، صداسنجی، ضخامت‌سنجی و تحلیل جریان الکتریکی تجهیز مجموعه‌ای از متداول‌ترین فعالیت‌های پایش وضعیت در حوزه نت پیش‌بینانه می‌باشد.

۴-۴-۱ مراقبت وضعیت توربین بادی [15-20]

در توربین‌های بادی تمامی تکنیک‌های پایش وضعیت ذکر شده در بخش قبل در اجزای مهم از جمله تیغه‌ها، گیربکس، ژنراتور، یاتاقان‌ها و برج مورد استفاده قرار می‌گیرد. مانیتورینگ می‌تواند به صورت آنلاین (مانیتورینگ به صورت دائمی) یا آفلاین (مانیتورینگ در بازه‌های زمانی مشخص) انجام پذیرد.

با جمع‌آوری اطلاعات و پردازش سیگنالی عملکرد مناسب جهت جلوگیری از خرابی قطعات، برنامه ریزی شده و زمان خرابی تشخیص داده می‌شود. در این حالت وظایف نگهداری و تعمیرات به صورت موثر برنامه ریزی شده و نتایج سبب افزایش قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، قابلیت نگهداری و ایمنی (RAMS) می‌گردد، این در حالی است که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و بهره‌برداری کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است تکنیک‌های پایش وضعیت در تمامی صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه به تکنیک‌های در دسترس اشاره می‌نماییم.

۴-۱ آنالیز ارتعاشات

در این روش ارتعاشات تجهیز اندازه‌گیری شده و بر اساس آن وضعیت دستگاه سنجیده می‌شود و در صورت وجود عیب می‌توان عیب را تشخیص داد. این روش بیشتر برای تجهیز دوار بکار می‌رود. در این روش، به تحلیل اسپتروگرام فرکانسی و سیگنال زمانی پرداخته می‌شود. اندازه‌گیری ارتعاشات به وسیله سنسورهای جابجایی، سرعت و شتاب صورت می‌گیرد. عموماً در اندازه‌گیری فرکانس‌های زیر ۲۰ هرتز و اندازه‌گیری حرکت نسبی از سنسور جابجایی، در اندازه‌گیری فرکانس‌های بین ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز از سنسور سرعت، و در اندازه‌گیری فرکانس‌های بالای ۲۰۰۰ هرتز از سنسور شتاب استفاده می‌گردد.

آنالیز ارتعاشات مشهورترین تکنیک در پایش وضعیت توربین‌های بادی می‌باشد. کاربرد این تکنیک در مانیتورینگ گیربکس، یاتاقان‌ها، تیغه‌ها، روتور و برج می‌باشد.

ساجمه‌ها و رولرها می‌باشد، که در اثر روغن کاری ناقص و یا اعمال نیروهای اضافی روی آن‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد. تکنیک تشخیص عیوب یاتاقان با دیگر عیوب ارتعاشی تفاوت دارد زیرا خرابی یاتاقان پالس‌های بسیار کم انرژی در فرکانس‌های بالا تولید می‌کند که عملاً این پالس‌ها در ارتعاشات ناشی از عیوب دیگر که عمدتاً مضاربی از دور ماشین هستند گم می‌شوند.

۴-۸ آنالیز کارایی

آنالیز کارایی (Performance Monitoring) یکی از تکنیک‌های مهم پایش وضعیت است که برای انواع مختلف تجهیزات به ویژه تجهیزاتی که در واحدهای فرآیندی به کار می‌روند و تجهیزاتی که آنالیزهای دیگر مانند ارتعاشات جوابگوی پایش کامل آنها نیست کاربرد دارد.

جمع آوری اطلاعات اولیه (مانند دبی، فشار، دما، آمپر مصرفی و...) به کمک انواع گیج‌ها، نشانگرها، سنسورها و ترانسمیترها صورت می‌پذیرد. ارتباط بین پارامترهایی مثل قدرت، سرعت باد، زاویه تیغه و سرعت روتور جهت ارزیابی، پایش و تشخیص خرابی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از این وسایل اندازه‌گیری دارای نشان دهنده در محل هستند و اطلاعات برخی دیگر از طریق سیستم کنترل مرکزی قابل دستیابی است.

پارامترهای بیان کننده کارایی ماشین (نظیر راندمان، هد تولیدی و...) به کمک فرمول‌ها و روابط ریاضی و بر اساس اطلاعات اولیه محاسبه می‌شوند. با trend کردن مقادیر پارامترهای بیان کننده کارایی ماشین در طول عمر آن، هرگونه انحراف از وضعیت نرمال مشخص شده و می‌توان با انجام اقدام اصلاحی، وضعیت را نرمال نمود. این تکنیک به ویژه برای توربین‌ها، پمپ‌ها، فن‌ها، مبدل‌های حرارتی، بویلرها و... از اهمیت خاصی برخوردار است. کاربرد این تست در تیغه و ژنراتور توربین بادی می‌باشد.

۴-۹ بازرسی رادیوگرافیک

در بازرسی رادیوگرافیک از اشعه ایکس برای پرتونگاری استفاده می‌شود. پرتو به جسم تابیده و به علت طول موج کم اشعه‌ها جذب قطعه می‌گردد. اگرچه این روش اطلاعات مفیدی را از اجزای سازه‌ی مورد بازدید فراهم می‌آورد اما استفاده از این روش به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. عکس‌برداری رادیوگرافی وابسته به سطوح مختلف از جذب فوتون‌هایی می‌باشد که از میان مواد عبور می‌کنند. جهت تشخیص خستگی‌های شدید، خردگی و شکاف‌های کمتر از $50\mu m$ از روش عکس‌برداری با اشعه ایکس استفاده می‌گردد. عکس‌برداری با این روش جهت تشخیص عیوب داخلی توربین‌های بادی مفید بوده و مزیت اصلی دقت آن می‌باشد. سیستم رادیوگرافی پرتابل به عنوان یک راه حل جهت تشخیص عیوب و کاهش هزینه بازرسی مطرح می‌گردد. هرچه طول موج کوتاه‌تر باشد قدرت نفوذ

علت ایجاد آن پی برد. به طور مثال افزایش عنصر مس در سیستم گیربکس می‌تواند ناشی از فرسایش یاتاقان‌ها باشد. این روش از آن جهت اهمیت دارد که می‌تواند خرابی را در مراحل اولیه نشان دهد، این در حالی است که در روش‌های قبل این موضوع قابل ارزیابی نمی‌باشد. این تست با ارزیابی فرسایش، آلودگی و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی اطلاعات جامعی جهت پایش وضعیت تجهیز ارائه می‌نماید. چنین روش‌هایی به طور ویژه در جلوگیری از خرابی‌های فاجعه بار موثر می‌باشند. کاربرد این روش در تشخیص خرابی یاتاقان، ژنراتور و گیربکس می‌باشد.

۴-۵ اندازه‌گیری کرنش

با استفاده از سنسورهای الکترونیکی می‌توان کرنش یا تغییرات نسبی طول یک جسم را اندازه‌گیری نمود، کرنش برابر با تغییرات طول یک ماده به حالت اولیه آن می‌باشد. کرنش سنج‌ها می‌توانند برای چهار گروه کلی محوری، برشی، خمشی و پیچشی به کار برده شوند با این وجود نوع محوری و خمشی متداول‌ترین نوع کرنش-سنج‌ها می‌باشند. ابعاد کرنش‌سنج‌ها از چند میلی‌متر مربع تا چند سانتی‌متر مربع است و دارای مقاومتی از چند ده تا چند هزارم اهم می‌باشند. کاربرد کرنش‌سنج‌ها در توربین‌های بادی اندازه‌گیری کرنش مربوط به تیغه و روتورها می‌باشد.

۴-۶ اثرات الکتریکی

پایش وضعیت تجهیزات الکتریکی مانند ژنراتور، موتور و باتری‌ها غالباً از طریق اندازه‌گیری ولتاژ و جریان صورت می‌پذیرد. در شبکه‌های ولتاژ بزرگ و متوسط اندازه‌گیری دشارژ ولتاژ بسیار اهمیت دارد. تحلیل طیفی جریان استاتور ژنراتور می‌تواند برای تشخیص خرابی‌های نهفته در سیستم کابل رسانی بدون تاثیر بر عملکرد توربین بسیار مفید باشد. مقاومت الکتریکی می‌تواند جهت ارزیابی ساختار اجزای خاصی از توربین بادی مورد استفاده قرار گیرد. تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی جهت تشخیص خستگی، شکست و خوردشدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد این تست در برج، ژنراتور و تیغه‌های توربین می‌باشد.

۴-۷ روش شاک پالس (SPM)

یاتاقان‌های غلتشی طول عمر محدود و مشخصی داشته و معمولاً پس از اتمام طول عمرشان باید تعویض شوند. اما در حین کار می‌توان آن‌ها را پایش نموده و با بررسی وضعیت ارتعاشی آن‌ها نسبت به ادامه کار یا تعویض آن تصمیم‌گیری کرد. تشخیص به موقع عیب یاتاقان در دستگاه‌های دوار می‌تواند از توقف ناگهانی و بدون برنامه‌ریزی جلوگیری کرده و برنامه‌ریزی و داشتن زمان کافی جهت سفارش یاتاقان جایگزین را امکان‌پذیر می‌نماید. عیوب یاتاقان‌ها معمولاً ناشی از جدا شدن موضعی مواد، ترک‌های ناشی از خستگی روی سطوح تماسی و خورد شدن یا ترک برداشتن اجزا غلتشی یعنی

واحد زمان متغیر بوده و مقدار آن قابل اندازه گیری است، چرا که در بازه های زمانی مشخص می توان مقدار سرعت را اندازه گیری و ثبت کرد. مجموعه اعدادی که از ثبت سرعت در بازه های زمانی مختلف به وجود می آیند، با همدیگر تشکیل یک سیگنال را می دهند. پردازش سیگنال ها یا علائم به فرایند تجزیه، تحلیل و تفسیر سیگنال ها اطلاق می شود، سیگنال مورد نظر می تواند صدا، دما، توان، سرعت و گشتاور و... باشد.

اجرای پذیری پایش وضعیت به ۲ اصل زیر وابسته می باشد:

۱. تعداد و نوع سنسورها
 ۲. پردازش سیگنال و روشهای ساده سازی
- یک سیستم اندازه گیری الکترونیک، اطلاعات به دست آورده را پردازش کرده و جهت مشاهده یا سیستم های کنترلی ارسال می نماید. اطلاعات جمع آوری شده شامل اندازه گیری متغیرهای مورد نیاز و تغییر آنها به سیگنال های الکتریکی می باشد. راه های مختلفی از جمله شبکه Ethernet با پروتکل های مختلف یا سیستم اسکادا* جهت کنترل و ارتباط بخشهای مختلف مجموعه توربین ها مطرح می گردد. اسکادا از روش های مختلف پردازش سیگنال استفاده می کند که در زیر به عناوین آنها اشاره می گردد:

۱. روش Statistical
۲. آنالیز روند (Trend analysis)
۳. روش Filtering
۴. آنالیز Time-domain
۵. آنالیز Cepstrum
۶. میانگین گیری Time synchronous
۷. تبدیل Fast-Fourier
۸. Amplitude demodulation
۹. آنالیز Order
۱۰. تبدیل Wavelet
۱۱. مدل Hidden Markov

۶- سیستم اسکادا در توربین بادی [10],[23]

سامانه سرپرستی و گردآوری داده یا اسکادا به تکنولوژی که امکان جمع آوری اطلاعات از تاسیسات دور دست و ارسال دستورالعمل های کنترلی به آنها را فراهم می کند اطلاق می شود. منظور از اسکادا یک سامانه مرکزی است که نظارت و کنترل یک سایت یا سیستم گسترده در فواصل زیاد (در حد چندین کیلومتر) را بر عهده دارد.

سیستم های اسکادا برای مانیتور کردن یا کنترل فرایندهای شیمیایی، حمل و نقل، سیستم های آبرسانی شهری، کنترل تولید و

پرتو در داخل جسم بیشتر است. تمام تابش در جسم نفوذ نمی کند بلکه قسمتی از آن جذب می شود. مقدار جذب تابعی از چگالی و ضخامت جسم می باشد. کاربرد این روش در تشخیص عیوب تیغه های توربین از اهمیت خاصی برخوردار می باشد.

۴-۱۰ ترموگرافی

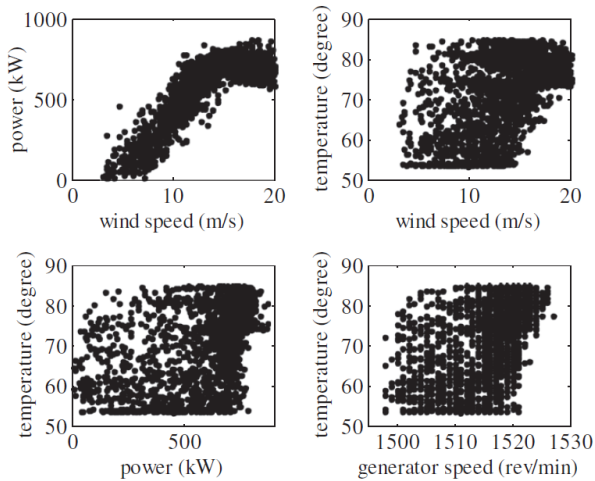
مطابق با قانون پلانک، هر جسمی که دمایی بالاتر از صفر مطلق یا صفر کلوین (K) داشته باشد از خود اشعه های تابشی مادون ساطع می کند. این تابش ها امکان دیده شدن جسم در شرایط نور مرئی و تاریکی مطلق را فراهم می کنند میزان پرتو مادون قرمز منتشر شده از هر جسم با تغییرات حرارتی جسم وابسته است. این اصل سبب می شود تا تغییرات نامحسوس دمایی در تصویربرداری فروسرخ قابلیت رویت داشته باشد.

ترموگرافی یکی از روش های پایش وضعیت و پیش بینی عیوب تجهیزات مکانیکی و الکتریکی می باشد که بر اساس اصل درگیری تجهیزات مکانیکی با یکدیگر و نیز عبور جریان از تجهیزات الکتریکی و مقاومت ناشی از عبور جریان پایه ریزی شده است. حرارت گسیل شده از سطوح خارجی اجسام به صورت تشعشعات مادون قرمز است که با چشم غیر مسلح قابل رویت نیست. این تشعشعات به وسیله دوربین های ترموگرافی که به نام دوربین های حرارتی نیز شناخته می شوند آشکار سازی می شود. این تجهیز حساس ابزار الکترونیکی و دقیق است که امواج مادون قرمز حرارتی منتشر شده از اجسام را به وسیله سنسورهای حساس خود جمع آوری می کند و به وسیله میکروپروسورهای دقیق خود تشعشعات گسیل شده را به یک تصویر رنگی با کیفیت همراه با جزئیات تبدیل می کند. البته باید توجه داشت که تصاویر ایجاد شده توسط دوربین حرارتی در اصل تصاویری سیاه سفید هستند که با کمک پردازش گر داخلی دوربین حرارتی به تصویر رنگی تبدیل می شوند. این روش اغلب جهت مانیتورینگ قطعات معیوب، اجرای الکتریک و الکترونیک و... مورد استفاده قرار می گیرد. این تکنیک با تفسیرهای دیداری از نقاط داغ به دلیل خرابی سیستم یا تماس های نامناسب اتفاق می افتد، دوربین های مادون قرمز به جهت تغییرات دیداری در دمای سطوح مورد استفاده قرار گرفته و می توانند در تشخیص ترک و شکاف ها موثر واقع گردند. لازم به ذکر است تحقیقات اولیه از نصب دوربین های ترموگراف جهت اندازه گیری حرارت تیغه ها با استفاده از بالگرد نتایج رضایت بخشی را نداشته و مشکل جدی در نصب تجهیزات ایجاد شده است. کاربرد این روش در تشخیص عیوب گیربکس، ژنراتور و تیغه های توربین بادی می باشد.

۵- پردازش سیگنال [8],[21],[22]

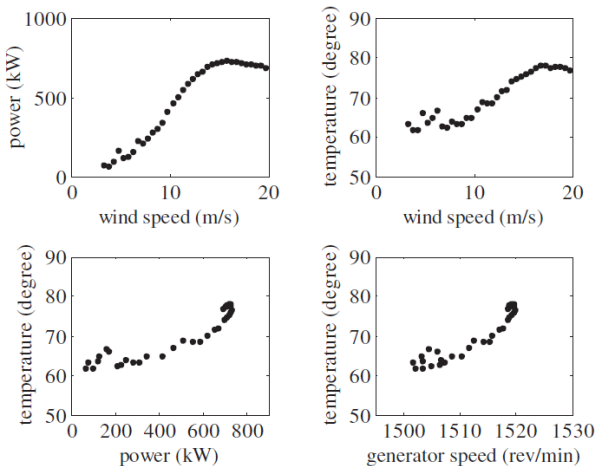
پردازش سیگنال علمی است که به آنالیز سیگنال ها می پردازد. به طور ساده هر کمیت متغیر در زمان یا مکان که قابل اندازه گیری باشد را سیگنال می گوئیم. به عنوان مثال سرعت کمیتی است که در

موجود می‌بایست از یک الگوریتم مناسب که در بخش قبل اشاره شد استفاده گردد، و نتایج آن در شکل (۶) ارائه گردیده است.



شکل (۵). اطلاعات خام اسکادا توربین بادی 750kw

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، نویزهای موجود از بین رفته‌اند.



شکل (۶). اطلاعات توربین بادی 750kw تحت پردازش سیگنال

۷- طراحی معیار خرابی سیستم تحت پایش وضعیت

[10],[11]

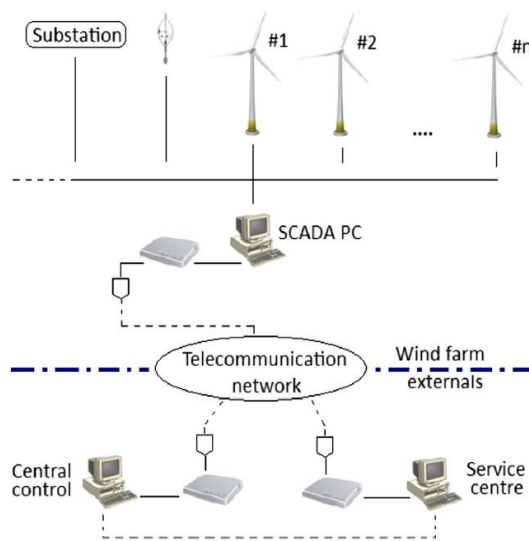
برای یک زوج از اطلاعات سیستم اسکادا، معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$\hat{y}_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_kx_i^k \quad (1)$$

که در معادله $a_j (j = 0, 1, \dots, k)$ ضرایب مدل بوده، k مرتبه معادله (در اینجا $k = 4$ می‌باشد) و \hat{y}_i تخمینی از y_i می‌باشد.

به جهت به دست آوردن بهترین تخمین از y_i ، شرایط زیر می‌بایست

توزیع انرژی الکتریکی و در خطوط نفت و گاز و سایر فرایندهای گسترده و توزیع یافته استفاده می‌شود. در یک سیستم اسکادا اتاق کنترل می‌تواند بر پایه داده‌های بدست آمده دستورهای لازم را صادر کند. همچنین این داده‌ها در یک سیستم ثبت اطلاعات یا سیستم مدیریت پایگاه داده ذخیره می‌شوند که معمولاً قابلیت ترسیم نمودار و تحلیل اطلاعات را هم دارد. یک سیستم اسکادا به وسیله مجموعه ای از PLC ها و DCS و سنسورهای هوشمند به همراه ایستگاه های RTU و شبکه های مختلف صنعتی و کامپیوترهای هاست و سرور ایجاد می‌شود.



شکل (۴). شماتیک کنترل مجموعه توربین های با استفاده از اسکادا

شکل (۴) چگونگی ارتباط تجهیزات را در مجموعه توربین از طریق سیستم اسکادا نشان می‌دهد. در یک سیستم اسکادا سیگنال و هشدارها به صورت میانگین اطلاعات ۱۰ دقیقه منتقل می‌گردند در این حالت روش های پایش وضعیت به اجرا در نمی‌آیند، در واقع در ابتدا سیستم اسکادا با هدفی جدا از پایش وضعیت طراحی شده بود و تمام اطلاعات مورد نیاز پایش وضعیت جمع آوری نمی‌گردید. از آنجا که مقادیر اطلاعات اسکادا در محدوده کاری مختلف می‌باشد، تشخیص آغاز خرابی از اطلاعات خام بسیار سخت بوده و در اینجا الزام استفاده از پردازش سیگنال جهت از بین بردن این عیوب مطرح می‌گردد.

برای فهم این موضوع، در شکل (۵) اطلاعات خام مربوط به توربین بادی ۳ تیغه 750kw ارائه گردیده است که در آن منظور از دما اشاره به دمای یاتاقان ژنراتور دارد، همانطور که مشاهده می‌گردد، علی‌رغم اینکه اطلاعات مربوط به میانگین اندازه گیری ۱۰ دقیقه بوده دارای نویز بسیار می‌باشد. حال جهت از بین بردن نویزهای

بنابراین ماتریس A میتواند به صورت زیر بیان گردد:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

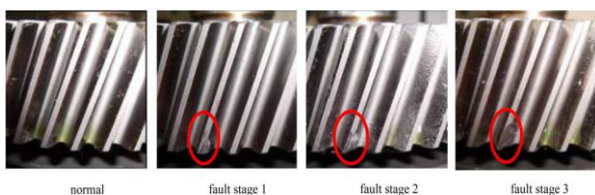
با کمک مدل‌های مشتق شده از داده‌های قبل و حال، شرایط سلامت با استفاده از معیار پایش وضعیت به صورت زیر می‌باشد:

$$C = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} |\sum_{j=0}^k (a_j - b_j) x_j| dx}{x_{max} - x_{min}} \quad (8)$$

که در معادله (۸) ضرایب a_j و b_j مدل مشتق شده از داده‌های حاضر و گذشته بوده، x_{min} و x_{max} حداقل و حداکثر مقدار x می‌باشند.

در معادله (۸) میتوان نتیجه گرفت در صورتیکه $C \approx 0$ توربین بادی سالم می‌باشد، این در حالی است که اگر $C > 0$ نشان دهنده خرابی در مجموعه می‌باشد، هرچه مقدار C تمایل به بزرگ شدن داشته باشد خرابی جدی تر است.

برای یک توربین بادی که دائماً تحت شرایط کاری مختلف می‌باشد، خصوصیات مربوط به خرابی معمولاً وابسته به شرایط بهره برداری می‌باشد. معیار C شرایط اصلی توربین را بر اساس رفتار کلی در محدوده x بجای پاسخ‌های لحظه‌ای ارزیابی می‌کند. معیار C شاخص کارآمد و قابل اعتمادی جهت تعیین سلامت توربین بادی می‌باشد.



شکل (۷). روند خرابی دندانه‌های دنده

در ادامه قصد داریم تفاوت شدت خرابی سطوح گیربکس و همچنین ارتباط پیشرفت خرابی با تماس سطح و سرعت را ارائه دهیم. شکل (۷) ابعاد خرابی دندانه‌ی یک دنده را نشان می‌دهد که در حالت اول ابعاد $3mm \times 2mm$ ، حالت دوم $5mm \times 5mm$ و حالت سوم $7mm \times 5mm$ می‌باشد. سرعت دورانی موتور DC، ارتعاشات گیربکس، گشتاور و توان ژنراتور در شکل (۸) نشان داده شده است.

مطابق با اصل حداقل مربع ارضا گردد:

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial(R^2)}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial(R^2)}{\partial a_k} = 0 \quad (2)$$

که در معادله بالا $R^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2$ اشاره به تخمین خطای کل دارد، حال با قراردادن معادله (۱) در روابط زیر را داریم:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

معادله (۳) یک ماتریس واندرموند می‌باشد، که می‌توان این ماتریس را به صورت زیر ساده کرد:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

حال با ضرب کردن هر بخش معادله (۴) در ترانزاده ماتریس اول داریم:

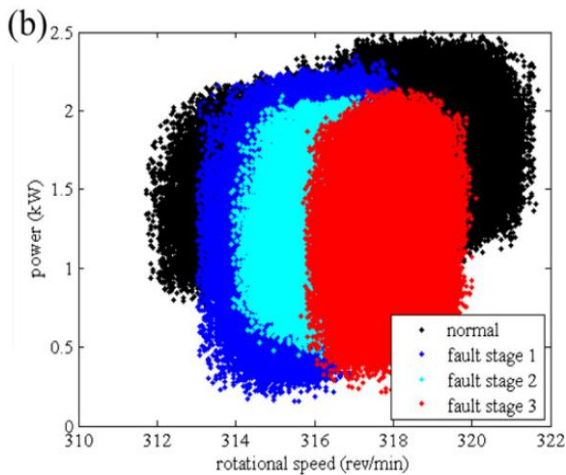
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^k & x_2^k & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^k & x_2^k & \dots & x_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

حال داریم:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \dots & x_n^k \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

بنابراین معادله (۵) به صورت زیر بیان میشود:

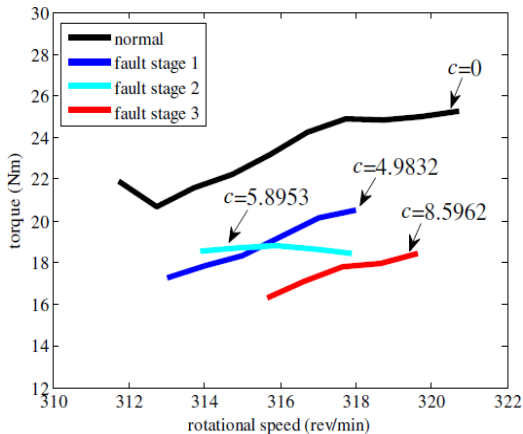
$$X^T X A = X^T Y \quad (6)$$



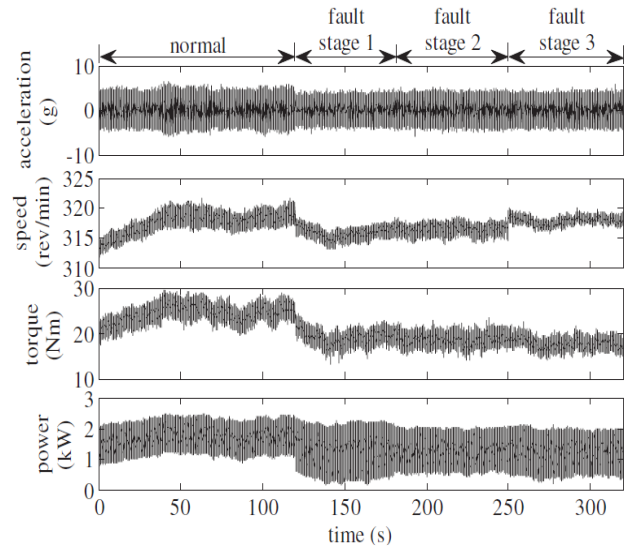
شکل (۱۰). ارتباط داده‌ها جهت تشخیص خرابی گیربکس (توان ژنراتور در برابر سرعت موتور DC)

از شکل (۹) و (۱۰) می‌توان فهمید:

۱. گشتاور شفت و توان ژنراتور با افزایش سرعت دورانی موتور افزایش می‌یابد، همچنین مقادیر آن در محدوده‌های مختلفی می‌باشد.
۲. بهره‌وری سیستم با بدتر شدن خرابی کاهش می‌یابد. جهت ارزیابی خرابی، روش مطرح شده پایش وضعیت تجزیه تحلیل گردید و نتایج آن در شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

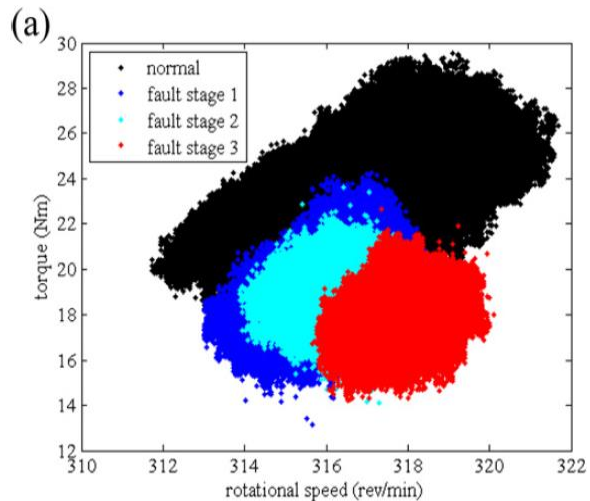


شکل (۱۱). نتایج تشخیص خرابی گیربکس با معیار پایش وضعیت (گشتاور ژنراتور در برابر سرعت موتور DC)



شکل (۸). اطلاعات خام مراحل خرابی گیربکس

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد ارتعاشات گیربکس مطابق انتظار با بدتر شدن اوضاع افزایش نمی‌یابد. حال با این تفاسیر شکل (۹) و (۱۰) جهت یافتن خرابی ارائه گردیده است. در شکل (۹) و (۱۰) گشتاور ژنراتور در برابر سرعت موتور DC و توان ژنراتور در برابر سرعت موتور DC ترسیم گردیده است.



شکل (۹). ارتباط داده‌ها جهت تشخیص خرابی گیربکس (گشتاور ژنراتور در برابر سرعت موتور DC)

بادی از نکات حیاتی برای توسعه اقتصادی نیروگاه‌های بادی می‌باشد، در واقع اگرچه با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله هزینه‌های نگهداری و تعمیرات تا حدود زیادی کاهش می‌یابد اما می‌بایست دسترسی مکان مورد استفاده به باد مناسب، دسترسی به خطوط انتقال، مسائل زیست محیطی و... در مراحل اولیه احداث مورد بررسی قرار گیرد تا اجرای این طرح توجیه پذیر گردد.

۹- نوآوری

مقاله حاضر روشی نوین در تلفیق علم مراقبت وضعیت، روش تحلیل اطلاعات (اسکادا) و پردازش سیگنال جهت از بین بردن نویز اطلاعات دریافتی می‌باشد، در واقع اساس کار به این صورت است که با استفاده از تکنیک‌های پیش وضعیت در قسمت‌های مختلف توربین بادی اطلاعات از دوردست (در فواصل مکانی چندین کیلومتر) جهت کنترل به سامانه مرکزی منتقل شده و سپس نویزهای اطلاعات دریافتی با استفاده از روش پردازش سیگنال از بین می‌رود که نهایتاً تمام اطلاعات مورد تحلیل قرار گرفته و در تشخیص سریع و به موقع خرابی قسمت‌های مختلف جهت کاهش هزینه‌ها اهمیت بسزایی پیدا می‌کند.

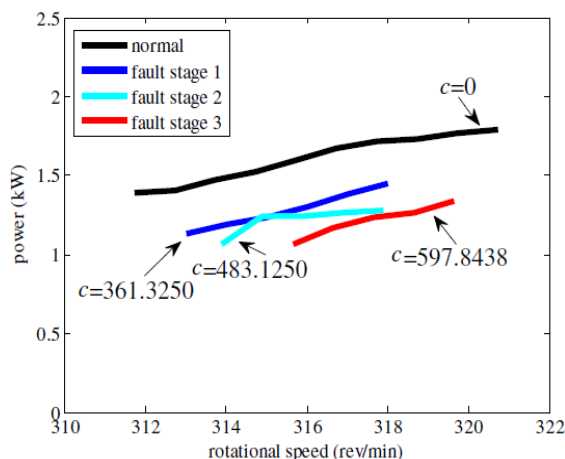
۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش نوآورانه بر اساس پیش وضعیت ارائه گردیده است. تمرکز این مطالعه بر روی پیش وضعیت و روش‌های ریاضی در جهت پردازش سیگنال روی زیرمجموعه‌های توربین‌های بادی می‌باشد، در واقع در این روش تمامی اجزا پیش می‌گردند. تکنیک‌های پیش وضعیت همراه با الگوریتم پردازش سیگنال یک مجموعه مناسب را در جهت نگهداری کیفی و افزایش قابلیت اطمینان فراهم کرده است. در اجرای روش ارائه شده می‌بایست موارد زیر مد نظر قرار گیرد:

۱. انتخاب تعداد و نوع سنسور
۲. انتخاب روش‌های پردازش سیگنال مرتبط با سنسورهای انتخاب شده
۳. استفاده از روش پردازش سیگنال غیرخطی به واسطه دقت و سرعت بالا

روش قدیم (انتقال اطلاعات با استفاده از سیستم اسکادا بدون پردازش سیگنال) ارزان بوده و مقادیر داده‌های آن وابسته به سلامت توربین نبوده بلکه وابسته به شرایط بهره برداری می‌باشد، در واقع وقتی تغییرات روی داده‌های اسکادا اتفاق می‌افتد نیاز به بررسی‌های بیشتر بجای تصمیم‌گیری در خصوص هشدار خرابی می‌باشد و در مقایسه با روش ارائه شده در این مقاله از دقت و قابلیت اطمینان

جلد ۹- شماره ۳- پاییز ۱۳۹۸



شکل (۱۲). نتایج تشخیص خرابی گیربکس با معیار پایش وضعیت (توان

ژنراتور در برابر سرعت موتور DC)

همانطور که در شکل (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌گردد، بدتر شدن خرابی به صورت آشکار با موقعیت منحنی‌های مدل اشاره شده در این بخش ارتباط دارد و زمانیکه معیار C برابر با ۰ باشد دستگاه در سلامت کامل و با افزایش کمی معیار سلامت دستگاه کاهش می‌یابد.

جدول (۱). عمده دلایل خرابی زیرمجموعه توربین بادی	
زیرمجموعه	دلایل خرابی
تیغه	اصطکاک و زبری سطح- ارتعاشات غیرطبیعی
روتور	اصطکاک و زبری سطح- خستگی- لغی پایه- نابالانسی به دلیل عدم تنظیم مناسب
ژنراتور	ارتعاشات غیرطبیعی- گرم شدن بیش از حد به واسطه خرابی سنسورها و... مشکلات الکتریکی- نابالانسی القایی و مقاومتی
یاتاقان	خستگی- سایش به واسطه تغییر شکل اجزای یاتاقان- خردگی پین‌ها
گیربکس	خرد شدن به واسطه خستگی یا تغییر شکل به دلیل تنش بیش از حد- گرم شدن- روانکاری نامناسب به دلیل آلودگی ذرات، فیلتر نامناسب یا ویسکوزیته پایین- سایش دندانه‌ها- انحراف به دلیل ناهماهنگی محور یا طراحی ضعیف
سیستم Yaw	ناماهنگی و انحراف زاویه سیستم Yaw
برج	پدیده رزونانس، ترک خوردگی و خستگی

در جدول (۱) عمده دلایل خرابی زیرمجموعه‌های توربین بادی ارائه شده است، که با مراقبت و پایش صحیح از اجزای اشاره شده می‌توان نرخ خرابی‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.

۸- تحقیقات آتی و محدودیت‌های تحقیق

با اجرایی شدن این روش در نیروگاه‌های بادی می‌توان در فاز بعدی نسبت به بررسی دقیق صرفه اقتصادی به تفکیک نوع نیروگاه بادی اعم از دریایی و خاکی اقدام کرد. انتخاب محل مناسب جهت نصب توربین‌های

[12] Knezevic J. Reliability, maintainability and supportability engineering: a probabilistic approach. McGraw Hill; 1993.

[13] Ben-Daya MS, Duffuaa AR. Handbook of maintenance management and engineering. Springer Verlag London Limited; 2009.

[14] Pedregal DJ, Garcia Marquez FP, Roberts C. An algorithmic approach for maintenance management. Annals of Operations Research 2009;166:109e24.

[15] Campbell JD, Jardine AKS. Maintenance excellence: optimizing equipment life-cycle decisions. New York: Marcel Dekker; 2001.

[16] Garcia Marquez FP. An approach to remote condition monitoring systems management. The IET International Conference on Railway Condition Monitoring; 2006:156e60.

[17] Garcia Marquez FP, Pedregal DJ, Roberts C. Time series methods applied to failure prediction and detection. Reliability Engineering & System Safety 2010;95(6):698e703.

[18] Levitin G. Genetic algorithms in reliability engineering. Reliability Engineering and System Safety 2006;91(9):975e6.

[19] Caselitz P, Giebhardt J. Fault prediction techniques for offshore wind farm maintenance and repair strategies. In: Proceedings of the EWEC2003; 2003.

[20] IEC International Standard IEC61400Part 11, wind turbine generator systems e acoustic noise measurement techniques; 2002.

[21] Yang W, Tavner P, Crabtree C, Feng Y, Qiz Y. Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges. Wind Energy 2012.

[22] Yang W, Court R, Jiang J. Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis. Renewable Energy 2013.

[23] Zaher A, McArthur SDJ, Infield DG, Patel Y. Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis. Wind Energy 2009; 12(6): 574–593.

بسیار پایین تری برخوردار می‌باشد. با استفاده از روش ارائه شده، همزمان خرابی‌های مکانیکی و الکتریکی در همان مراحل اولیه به صورت صحیح، موثر، دقیق و قابل اطمینان تشخیص داده می‌شوند. استفاده از این روش در کلیه توربین‌های بادی مخصوصاً توربین‌های بادی واقع در دریا به واسطه ی صعب العبور بودن، زمان طولانی و هزینه بالای تعمیرات توصیه می‌گردد.

۱۱-مراجع

[1] WWEA. World wind energy report 2009, <http://www.wwindea.org>; 2009.

[2] McGowan JG, Connors SR. Windpower: a turn of the century review. Annual Review of Energy and the Environment 2000;25:147e97.

[3] Milborrow D. Operation and maintenance costs compared and revealed. Wind Stats 2006;19(3):3.

[4] Vachon W. Long-term O&M costs of wind turbines based on failure rates and repair costs. In: Proceedings WINDPOWER, American wind energy Association Annual conference. Portland: Oregon; 2002. p. 2e5. June.

[5] Walford C. Wind turbine reliability: understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs. Sandia report, AND2006-1100. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratories; 2006.

[6] Tavner PJ, Spinato F, van Bussel GJW, Koutoulakos E. Reliability of different wind turbine concepts with relevance to offshore application. Brussels: European Wind Energy Conference; April 2008.

[7] Anon. Managing the wind: reducing Kilowatt-Hour costs with condition monitoring. Refocus 2005;6(3):48e51.

[8] Marquez F, Perez J, Tobias A, Papaalias M. Renewable Energy. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods, 2012.

[9] de Novaes Pires G, Alencar E, Kraj A. Remote conditioning monitoring system for a hybrid wind diesel system-application at Fernando de Naronha Island, Brasil. <http://www.ontario-sea.org> (19-07)

[۱۰] Igarashi T, Hamada H. Studies on the vibration and sound of defective roller bearings (First report: vibration of ball bearing with one defect), Bull. JSME June 1982;25(204):994e1001.

[1۱] Igarashi T, Yabe S. Studies on the vibration and sound of defective roller bearings (First report: sound of ball bearing with one defect), Bull. JSME 1983;26(220):1791e8.