



## گواهینامه

پذیرش، چاپ و ارائه مقاله

شماره: BHH-00413-AB

بدینوسیله گواهی می شود مقاله پژوهشگران محترم:

**رضا کوتاهی، عباس روحانی، محمد طبسی زاده**

با نظر هیات داوران، تحت عنوان:

**روش های پایش وضعیت بلبرینگ توربین بادی**

در اولین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در علوم و مهندسی، جهت چاپ در مجموعه مقالات کنفرانس مورد تایید و پذیرش قرار گرفته و در این کنفرانس که توسط موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری در ۵ مرداد ماه ۱۳۹۶ در شهر مشهد برگزار شد، ارائه گردیده است. با تقدیم این گواهی، ضمن اعلام تایید پذیرش مقاله مذکور، از درگاه خالق یکتا موفقیت روز افزون شما را در عرصه های دانش و پژوهش مسئلت می نمایم. لازم به ذکر است، کلیه مقالات این کنفرانس در پایگاه سیویلیکا و پایگاه استنادی علوم جهان اسلام ISC نمایه خواهد شد.



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری



موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری





## روش های پایش وضعیت بلبرینگ توربین بادی

رضا کوتاهی<sup>۱</sup>، عباس روحانی<sup>۲\*</sup>، محمد طبسی زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲ و ۳- نویسنده مسوول: استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

Email: arohani@um.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

تکنولوژی انرژی باد رشد بسیار زیادی در رابطه با اندازه‌ی توربین و سهم بازار تجربه کرده است. با بالا رفتن تقاضای توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ و عملیات لر و هزینه نگهداری و تعمیر رو به افزایش، گرایش به سیستم پایش وضعیت به سرعت افزایش یافت. اجزاء اصلی توربین‌های بادی مورد توجه همه‌ی سیستم‌های پایش وضعیت هستند، زیرا اغلب موجب هزینه‌های گزاف تعمیر و خرابی تجهیزات می‌شوند. با این وجود، مقادیر زیادی از شکستگی‌ها به دلیل شکستن بلبرینگ رخ می‌دهد. این مقاله به بررسی تکنیک‌های پایش وضعیت بلبرینگ توربین بادی و اهمیت استفاده از این تکنیک‌ها جهت بهبود هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و تعمیر و افزایش قابلیت اطمینان می‌پردازد. در این مطالعه تحقیقات صورت گرفته توسط نویسندگان مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

واژگان کلیدی: توربین‌های بادی، پایش وضعیت، عیب‌یابی.

### ۱- مقدمه

امروزه انرژی باد منبعی تجدیدپذیر، قابل اعتماد و در حال رشد در جهان است. با این وجود، صنعت هنوز شکست‌های زود هنگام اجزای اصلی را تجربه می‌کند، که موجب گران تمام شدن هزینه‌های عملیات و نگهداری و تعمیر می‌شود (شنگ و ورس، ۲۰۱۱). برای مثال، ترک‌های اولیه بلبرینگ‌ها، کمتر از ۳ سال کارکرد یا ۵-۱۰ درصد عمر مورد نظر تشخیص داده شده است (استادلر و استادنراچ، ۲۰۱۳). از سوی دیگر، بلبرینگ‌ها تأثیر بالایی بر هزینه و قابلیت اطمینان دارند. مثلاً: بلبرینگ‌ها باعث بیش از ۵۰ درصد شکست گیربکس‌ها می‌شوند. بنابراین ۵۰ درصد کل هزینه‌ها مربوط به این شکست‌هاست (کلر و همکاران، ۲۰۱۲). در نتیجه پایش وضعیت بلبرینگ توربین بادی در اولویت محدود کردن شکست‌های زود هنگام قرار گرفته است. برای جلوگیری از چنین شکست‌های زود هنگامی، توسعه طراحی‌های بهتر توربین بادی و نیز اجرای تکنیک‌های پایش وضعیت مقرون به صرفه و قابل اطمینان لازم است (مجله انرژی باد، ۲۰۱۵).



## ۲- تعریف پایش وضعیت و اهمیت بلبرینگ ها

پایش وضعیت پروسه‌ی کنترل کردن یا وسیله‌ای حساس که بر تشخیص اولیه‌ی نقایص، شکست‌ها و سایش ماشینی متمرکز است. مقصود آن به حداقل رساندن هزینه‌های خرابی و هزینه‌های عملیات و نگهداری و تعمیر و متعاقباً به حداکثر رساندن تولید است (مارکز و همکاران، ۲۰۱۲). بطور کلی تر سیستم پایش وضعیت را می‌توان به عنوان فرآیند یا وسیله‌ای تعریف نمود که تکنولوژی، افراد متخصص، شاخص‌های وضعیت و داده یا اندازه‌گیری کیفیت را به منظور تخمین وضعیت سلامت ماشین و جهت بهترین تصمیم‌گیری درباره‌ی نگهداری و تعمیر ادغام می‌کند (شارما و ماهتو، ۲۰۱۳). دریافتن تاثیر شکست‌های بلبرینگ بر توربین بادی بسیار حائز اهمیت است. در زمینه‌ی پایش وضعیت، مطالعات گیربکس و ژنراتور مورد توجه مقالات متعددی قرار گرفته است. علت این توجه به دلیل تاثیر بالایی که بر خرابی تجهیزات می‌گذارد و در نتیجه فقدان شدید تولید می‌باشد. گرچه مطالعات اخیر نشان داده است که بلبرینگ‌ها حدوداً ۷۰ درصد موجب خرابی گیربکس و ۲۱-۷۰ درصد سبب خرابی ژنراتورها (۲۱ درصد در ژنراتورهای کوچک و ۷۰ درصد در ژنراتورهای متوسط و ۵۰ درصد در ژنراتورهای بزرگ) می‌شوند (ویتل، ۲۰۱۳).

## ۳- تکنیک‌های اکتساب داده

### ۳-۱- اندازه‌گیری آکوستیک (Acoustic Measuremet)

پایش آکوستیک شبیه پایش ارتعاش می‌باشد؛ گرچه تفاوت‌های اساسی میان‌شان وجود دارد. سنسورهای ارتعاش بصورت سفت به جزء دیگر متصل شده است، درحالی‌که سنسورهای آکوستیک به وسیله‌ی یک چسب منعطف با مقاومت زیاد، به جزء مورد نظر وصل شده است. سنسورهای ارتعاش حرکت موضعی را ثبت می‌کند، درحالی‌که سنسورهای آکوستیک بوسیله‌ی کنتورهای سطح صدا به یک بخش گوش می‌کند (وربروگن، ۲۰۰۳). اساس کار تمامی این حسگرها خاصیت کریستال‌های پیزوالکتریک است. امواج التراسونیک، توسط ارتعاش مولکول‌های هوا منتشر می‌شوند. وقتی این ارتعاش به حسگرها منتقل می‌شود، کریستال پیزوالکتریک دائماً فشرده و رها می‌شود (طاهری، ۱۳۸۸). این دستگاه‌ها دارای میکروفونی هستند که سطوح و تفاوت‌های فشار را از داخل و خارج به سیگنال ولتاژ تبدیل می‌کند، که سپس در یک کنتور ثبت می‌شود (راجرس و همکاران، ۲۰۰۶). مزیت برجسته‌ی این تکنولوژی، توانایی و حساسیت به ثبت ریز-آسیب‌های سطحی و زیر سطحی است. همچنین دارای پتانسیل مقرون به صرفه‌تر، ساده‌تر و قابل اعتمادتر میان تکنیک‌های پایش وضعیت می‌باشد (تیجنبرگ و وینراگ، ۲۰۱۲). تاکنون در بعضی موارد ثابت شده است که ارتعاش صدا می‌تواند تشخیص نقص سریع‌تری را نسبت به سیستم‌های پایش وضعیت ارتعاش تضمین کند (نیکنام و همکاران، ۲۰۱۳).

### ۳-۲- پایش اثرات الکتریکی (Electrical effects monitoring)

مجموعه تست‌های آنالیز اثرات الکتریکی به عنوان یک روش نامتداخل‌گر در روند کاری الکتروموتورها شناخته شده است. این تکنیک با نمونه‌گیری از جریان و ولتاژ تغذیه الکتروموتورها و به کارگیری ابزارهای پردازش سیگنال در حوزه‌های زمان و فرکانس متناسب با مشخصات الکتروموتور سلامت الکتروموتور را بررسی می‌کند. از مزایای این روش علاوه بر تشخیص خرابی در مراحل ابتدایی، قابلیت اندازه‌گیری از راه دور است (صفری، ۱۳۹۲). برای ارزیابی ساختار اجزای خاص توربین بادی می‌توان





مقاومت الکتریکی را نیز مورد استفاده قرار داد، زیرا دارای سختی متفاوت است. بنابراین، این تکنیک قابلیت تشخیص تغییراتی که ممکن است باعث شکاف، ورقه ورقه شدن و یا فرسودگی شود را دارد (مارکز و همکاران، ۲۰۱۲).

### ۳-۳- کیفیت توان (Power quality)

یکی از مسایل مهمی که در مورد توربین های بادی باید مد نظر قرار گیرد. مسئله کیفیت توان آن هاست، کیفیت توان مفهومی گسترده دارد. هر مسئله ای که باعث ایجاد تغییر ولتاژ، جریان یا فرکانس سیستم شود، موجب خرابی و عملکرد نادرست تجهیزات می گردد (سماواتی، ۱۳۹۵).

### ۳-۴- پایش دما (Temperature Monitoring)

پایش دمای اجزای توربین بادی یکی از معمول ترین روش های پایش وضعیت است. پایش دما جهت نگهداری پیشگیرانه یا پیش بینانه نیز قابل استفاده است و با سنسورهای متعددی اندازه گیری می شود. اندازه گیری های دمای هر یک از اجزاء، مانند دمای بلبرینگ، به دلیل اینکه اطلاعات بیشتری می دهند و در آنالیزهای متفاوتی کاربرد دارند، بسیار حائز اهمیت است. بعضی از وضعیت های محیط داخلی و خارجی ماشین ها می تواند اندازه گیری های دما را تحت تاثیر قرار دهد. مثلا دما همراه با بار الکتریکی تغییر می کند. در نتیجه، آگاهی از اینکه آیا دما به دلیل نقص یا به سبب بار الکتریکی بالاتر افزایش یافته، با تجزیه و تحلیل سیر تکاملی دما در بلبرینگ اهمیت دارد. نقطه ضعف پایش دما این است که در مقایسه با دیگر تکنیک های پایش وضعیت به آهستگی و گاهی بسیار دیر پیشرفت می کند. به عبارت دیگر، می توان گفت پایش دما به تنهایی به اندازه ی تکنیک های دیگر جهت تشخیص زود هنگام و دقیق، کافی نمی باشد (چاکوا و همکاران، ۲۰۱۴).

### ۳-۵- پایش ناخالصی های روانکار (Oil Debris Monitoring)

بلبرینگ ها و چرخ دنده های توربین بادی آسیب مداومی را متحمل می شوند که تراشه یا باقی مانده ذرات سایشی را به دنبال دارد. مادامی که آسیب بیشتر شود، باقی مانده بیشتر و بیشتری خواهد بود که در سیستم روانکار حمل خواهد شد تا زمانی که در فیلتر روغن پایان یابد (توماس، ۲۰۱۴). هدف اصلی در این روش، شناسایی باقی مانده ی فلزات موجود در روغن است. این هدف به صورت سیستم آنالاین به همراه سنسورهای حساس یا شمارنده ذرات نصب شده در توربین بادی قابل استفاده است، و یا به صورت آفلاین با نمونه گیری متناوب اجرا می شود. تکنیک پایش وضعیت باقی مانده آنالاین جهت تشخیص اولیه و پیگردی آسیب است. با این وجود، پایش روغن بیشترین مراجعه آفلاین با نمونه گیری متناوب به شمار می رود. از سوی دیگر، این موقعیت در حال تغییر است و پایش آنالاین روغن در حال متداول تر شدن است. زیرا اندازه ی مستقیم شدت و پردازش نقص را با شمارش ذرات فراهم می کند (شنگ، ۲۰۱۳).



### ۳-۶- آنالیز ارتعاش (Vibration Analysis)

تقریباً تمام ماشین آلات دوار در هنگام کار مرتعش می شوند. این ارتعاشات به علت وجود لقی های بیست که توسط طراح و سازنده در نظر گرفته شده و وجود آن ها در قطعات ماشین اجتناب ناپذیر است. اما تغییر مشخصات ارتعاشی یک ماشین نسبت به حالت اولیه، نشان دهنده آغاز یک نقص است و عیوب مختلف، به طرق متفاوت باعث تغییر در مشخصات ارتعاشی آن ماشین می شوند به همین دلیل مشخصات ارتعاشی، بیانگر نوع، شدت و محل خرابی ها، و به عبارتی زبان ماشین آلات دوار است (طاهری، ۱۳۸۸). آنالیز ارتعاش متداول ترین تکنولوژی پایش وضعیت بکار رفته در صنعت برای هرگونه وسیله چرخشی، و ابزاری کارآمد جهت پیش بینی نقص بلبرینگ می باشد (شاکیا و همکاران، ۲۰۱۳).

### ۴- بررسی روش های عیب یابی و تشخیصی برای بلبرینگ ها

در بررسی این روش ها اقدام به معرفی برخی از نویسندگانی که در زمینه های مد نظر مطالعاتی را انجام داده اند می نمایم.

#### ۴-۱- اندازه گیری صوت

(توصیفان و همکاران، ۲۰۱۳) مطالعه ای بر روی ویژگی های انتشار صوت حاصل از بلبرینگ های لغزشی تحت شرایط مختلف جهت تشخیص خرابی انجام دادند. آن ها یک دکل آزمایشی برای تست دو بلبرینگ نگهدارنده در یک موتور که یکی در انتهای بدون راه انداز (متحرک) و دیگری در انتهای محرک نصب شده بود را درست کردند. هدف آن ها از این مطالعه، ایجاد یک رابطه، بین فعالیت انتشار صوت با سرعت دورانی، بار شعاعی و روان کننده با ویسکوزیته مختلف بود. سپس بعد از انجام آزمایشات مورد نظر، به تحلیل دامنه زمان و فرکانس پرداختند که نتایج آن ها نشان داد:

(۱) ویژگی های اندازه گیری صوت در ارتباط مستقیم با، بار شعاعی، سرعت دورانی و روانکار با ویسکوزیته مختلف می باشند.

(۲) سیگنال های ترکیبی به دست آمده از اندازه گیری صوت برای نشان دادن مقدار سطح انرژی در بار بالا و سرعت بالا موفقیت آمیز بود.

(۳) افزایش ویسکوزیته باعث کاهش تماس با سطح زبر و بنابراین منجر به کاهش دامنه اندازه گیری صوت می گردد. تعدادی از محققان همانند: (اوه و همکاران، ۲۰۰۹)، (افتخارنژاد و همکاران، ۲۰۱۰)، (الفورجانی و همکاران، ۲۰۱۱)، (کیلانندو و همکاران، ۲۰۱۱)، (الفورجانی و همکاران، ۲۰۱۲)، (ناینهوس و همکاران، ۲۰۱۲)، (سندووال و همکاران، ۲۰۱۳)، (نیکنام و همکاران، ۲۰۱۳)، (جیان و همکاران، ۲۰۱۳)، (جیا و همکاران، ۲۰۱۳)، (لاو و همکاران، ۲۰۱۳)، (علی و همکاران، ۲۰۱۴)، (کارسل و همکاران، ۲۰۱۴)، (چاکون و همکاران، ۲۰۱۵) تحقیقاتی در زمینه عیب یابی بلبرینگ توربین بادی بر اساس روش اندازه گیری صوت انجام دادند. تمامی این مطالعات نشان دادند که انتشار صوت برای شناسایی خرابی در مراحل اولیه نسبت به آنالیز ارتعاش حساس تر و کارآمدتر می باشد.

#### ۴-۲- پایش اثرات الکتریکی

(صفری، ۱۳۹۲) مطالعه ای درباره بکارگیری از آنالیز اثرات الکتریکی در عیب یابی الکتروموتورها انجام دادند. آن ها از این روش برخی از عیوب مکانیکی نظیر: بیرینگ ها و گیربکس ها که با این روش آشکار سازی شده اند را مورد بررسی قرار دادند.



نتایج نشان داد که تکنیک آنالیز اثرات الکتریکی علاوه بر تشخیص عیوب الکتریکی موتورها قادر به تشخیص عیوب مکانیکی آنها نیز می باشد. این روش برای تقویت تکنیک های پایش وضعیت تجهیزات دوار در محلی کردن عیوب می تواند به کار گرفته شود. همچنین در مواردی که موتور در مکانی صعب العبور و یا زیر آب قرار دارد از این تکنیک می توان به عنوان یک روش کارا و مفید جهت پایش وضعیت هرچه بهتر استفاده کرد.

تعدادی از محققان همانند: (رینادین و همکاران، ۲۰۱۰)، (هولگر و همکاران، ۲۰۱۲)، (نتی و همکاران، ۲۰۱۲)، (ویتل و همکاران، ۲۰۱۳)، (هرلیسکا و همکاران، ۲۰۱۳)، (امیرات و همکاران، ۲۰۱۳)، (اوبرگ و همکاران، ۲۰۱۳)، (رومانکو و همکاران، ۲۰۱۴)، (ماچادو و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعاتی در جهت عیب یابی بلبرینگ توربین بادی با استفاده از روش پایش اثرات الکتریکی انجام دادند. نتایج مطالعات آنها حاکی از آن بود که روش مد نظر برای پایش عیوب بلبرینگ حتی نسبت به روش آنالیز ارتعاش کارآمدی بالاتری را دارد.

#### ۳-۴- کیفیت توان و پایش دما

کیفیت توان و پایش دما به دلیل اینکه اغلب روش های عیب یابی و تشخیص عیب بلبرینگ ها از اندازه گیری های دما و اطلاعات توان به دست آمده از طریق سیستم کنترل نظارتی و کسب داده<sup>۱</sup> استفاده می کنند با یکدیگر ترکیب شده اند. (کیم و همکاران، ۲۰۱۲) اقدام به طراحی سیستم تشخیص خرابی توربین بادی بر اساس منحنی عملکرد کردند. آنها برای این کار از منحنی عملکرد توان استفاده نمودند و همچنین دمای بلبرینگ های ژنراتور و جعبه دنده را نیز در تحلیل مورد نظر خویش بکار بردند. آنها یک الگوریتم عیب یابی را با استفاده از شبکه عصبی توسعه دادند. به منظور بررسی اثر بخشی منحنی عملکرد از روی طرح تشخیص خطا، داده های SCADA از سیستم توربین بادی ۸۵۰ کیلوواتی نصب شده در ساحل کوسان کره تهیه شد و مطالعات با شبیه سازی های مختلفی صورت گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم عیب یابی توسعه داده شده به وسیله شبکه عصبی به طور موثری قادر به آشکار سازی رفتار عادی و غیر عادی توربین بادی بود. همچنین منطق ساده تشخیص خرابی بر اساس پایش ناخالصی های روانکار می تواند کاربرد مناسبی در سیستم شناسایی خرابی توربین بادی داشته باشد. تعدادی از محققان همانند: (اولویول و همکاران، ۲۰۱۱) - (گوا و همکاران، ۲۰۱۲) - (کوسیاک و همکاران، ۲۰۱۲) - (یانگ و همکاران، ۲۰۱۳) - (استولفی و همکاران، ۲۰۱۴) - (شهریار و همکاران، ۲۰۱۵) تحقیقاتی مبنی بر عیب یابی بلبرینگ توربین بادی با استفاده از روش کیفیت توان و دما به انجام رسانیدند. نتایج این مطالعات نشان داد که این روش می تواند به طور موفقیت آمیزی آسیب های اولیه در بلبرینگ ها را آشکار نماید.

#### ۴-۴- پایش ناخالصی های روانکار

(جیانگ و همکاران، ۲۰۱۲) به پایش وضعیت سایش بلبرینگ غیر فلزی گیربکس براساس آنالیز روغن پرداختند. آنها با استفاده از تکنیک های جامعی از آنالیز روغن شامل: تجزیه و تحلیل معمولی فیزیکی و شیمیایی، تحلیل طیف اتمی، تجزیه و تحلیل فرورگرافی و تجزیه و تحلیل فیلترگرام برای آنالیز روغن دنده استفاده کردند. نتایج حاصل از طیف سنجی نشر اتمی و فرورگرافی نشان داد که کیفیت روغن دنده نرمال بود. اما نتایج حاصل از فیلترگرام نشان داد که روغن دنده موجود دارای ذرات سایشی غیر فلزی در اندازه های بزرگ به مقدار زیاد بود. همچنین نتایج حاکی از آن بود که بلبرینگ های غیر فلزی موجود در

1- Supervisory control and data acquisition (SCADA)





گیربکس دچار چسبندگی شدیدی شده و سایش برشی ایجاد شده است. که نشان دهنده این بود که چرخ جعبه دنده احتمالا غیر طبیعی و یا تکمیل نشده بود. از آنجایی که شاخص های فیزیکی و شیمیایی مناسب بودن روغن را تایید نمودند بنابراین با استفاده از فیلترهای با راندمان بالاتر و رسیدن به استاندارد ISO ۱۶/۱۴/۱۲ مورد نظر می توان از روغن موجود استفاده مجدد نمود. بنابراین تلفیق اساسی چندین تکنولوژی آنالیز روغن می تواند یک راه موثر و خوبی برای بهبود قابلیت اطمینان دستگاهها با استفاده از پایش وضعیت ذرات سایشی آنها باشد. تعدادی از محققان همانند: (بای و همکاران، ۲۰۱۱)، (دوپویس، ۲۰۱۲)، (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۲) مطالعاتی در زمینه عیب یابی بلبرینگ توربین بادی با استفاده از روش پایش ناخالصی های روانکار انجام دادند. نتایج این مطالعات نشان داد که پایش روغن یک روش پایش وضعیت مؤثر برای جلوگیری از چنین خرابی هایی خواهد بود و عمر بلبرینگها را افزایش می دهد.

#### ۴-۵- آنالیز ارتعاش

(زبانی و همکاران، ۲۰۱۲) مطالعه ای در خصوص عیب یابی بلبرینگ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> انجام دادند. سیگنال های حوزه زمان از جعبه دنده های سالم و معیوب استخراج شده و به عنوان ورودی در شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفتند. سیگنال های پیش پردازش شده در پنج کلاس (یک حالت سالم و چهار حالت برای عیب های مختلف) به عنوان ورودی به شبکه عصبی وارد شدند. همچنین ویژگی های سیستم بر مبنای الگوریتم ژنتیک انتخاب شده و توسط آنالیزهای خطی<sup>۳</sup> به عنوان تابع ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. محققان جهت انجام آزمایش و مقایسه نتایج با بلبرینگ سالم اقدام به ایجاد خرابی های ساختگی نمودند. آنها مطالعه خود را یکبار با طبقه بندی عملکرد شبکه عصبی بدون انتخاب ویژگی ها و بار دوم با انتخاب ویژگی ها از طریق الگوریتم ژنتیک انجام دادند. برای طبقه بندی عملکرد شبکه عصبی بدون انتخاب ویژگی ها نتایج نشان داد که آموزش شبکه برای ویژگی های مختلف مجموعه با ۱۰۰ درصد عملکرد همراه بوده است. آزمون عملکرد با استفاده از مجموعه آماری ۹۰ درصد و بهترین عملکرد، ۱۰۰ درصد با مجموعه طیفی به دست آمد. در حالی که آنها عملکرد ۸۵ درصدی با ترکیب مجموعه های آماری و طیفی را به دست آوردند. همچنین در ادامه نتایج طبقه بندی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی با انتخاب ویژگی ها از طریق الگوریتم ژنتیک نشان داد که آزمون عملکرد شبکه عصبی با استفاده از ویژگی های مناسب بهبود یافته است. برای آزمون های مختلف این عملکرد ۱۰۰ درصد است. در نهایت نتیجه نهایی مطالعه نشان داد که استفاده بالقوه از تکنیک الگوریتم ژنتیک و طرح معیاری در انتخاب ویژگی ها اجازه می دهد تا خطا در مراحل اولیه شناسایی گردد. تعدادی از محققان همانند: (میائو و همکاران، ۲۰۱۱)، (جایاسوال و همکاران، ۲۰۱۱)، (عبدوسیام و همکاران، ۲۰۱۱)، (واترز و همکاران، ۲۰۱۳)، (کومار، ۲۰۱۳)، (سان و همکاران، ۲۰۱۳)، (لی و همکاران، ۲۰۱۳)، (ژائو و همکاران، ۲۰۱۳)، (سان و همکاران، ۲۰۱۳)، (لیانگ و همکاران، ۲۰۱۴)، (اونال و همکاران، ۲۰۱۴)، (دیبالا و همکاران، ۲۰۱۴)، (دالوند و همکاران، ۲۰۱۴)، (آهن و همکاران، ۲۰۱۴)، (زیمروز و همکاران، ۲۰۱۴)، (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴)، (خانام و همکاران، ۲۰۱۴)، (سعیدی و همکاران، ۲۰۱۴)، (زارعی و همکاران، ۲۰۱۴)، (علی و همکاران، ۲۰۱۵) تحقیقاتی در زمینه عیب یابی بلبرینگ توربین بادی با استفاده از روش آنالیز ارتعاش انجام دادند. نتایج مطالعات آنها حاکی از آن بود که این روش

1-Artificial Neural Network (ANN)

2-Genetic algorithms (GA)

3- Linear discriminant analysis (LDA)



به طور موفقیت آمیزی عیوب در مراحل اولیه را آشکار ساخته و یک ابزار قابل اعتماد برای ارزیابی وضعیت سلامت و خرابی بلبرینگ می باشد.

### ۵- نتیجه گیری

در پایان، اهمیت پایش وضعیت بلبرینگ توربین های بادی به دلیل اثر بالایی که بر خرابی و تعویض قطعات می گذارند باید در نظر گرفته شود. اکثر در شکست های بلبرینگ گیربکس ها و ژنراتورها، هزینه ی تعویض بلبرینگ کمتر از هزینه خرابی و جایگزین کردن ژنراتورها یا گیربکس ها می باشد و پایش وضعیت بلبرینگ توربین بادی از طریق سیستم های تجاری متعددی قابل اجراست. با این وجود، فرصت های تحقیقاتی مختلفی در بخش های دانشگاهی و صنعتی در حوزه های کاری زیر امکان پذیر است:

۱. حالت خودکارسازی، قابلیت اجرا و ارتقاء پذیری سیستم پایش وضعیت
۲. تکنیک ها و الگوریتم ها برای تشخیص اولیه
۳. سیستم پایش وضعیت آنلاین و همراه با پیش بینی هوشمند
۴. تخمین زدن عمر مفید باقی مانده

### منابع و مراجع

- [۱] سماواتی، ا. (۱۳۹۵)، "بهبود کیفیت توان توربین های بادی با به کارگیری STATCOM"، دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی برق و علوم کامپیوتر، ۲۴ اردیبهشت، رامسر، ایران.
- [۲] صفری، ع. (۱۳۸۸) "به کارگیری از آنالیز اثرات الکتریکی در عیب یابی الکتروموتورها"، هشتمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات"، ۶-۷ اسفند، تهران، ایران.
- [۳] طاهری، ع. (۱۳۸۸) "مروری بر رایج ترین روش های نگهداری و تعمیرات و پایش وضعیت ماشین آلات"، چهارمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات"، ۱۰-۱۲ اسفند، تهران، ایران.

[۴] Whittle, M. (2013). Wind turbine generator reliability: an exploration of the root causes of generator bearing failures (Doctoral dissertation, Durham University).

[۵] Verbruggen, T. W. (2003). Wind turbine operation and maintenance based on condition monitoring WT-Ω. ECN, Energy research Center of the Netherlands) Final report, ECN-C-03-047.

[۶] Rogers, A. L., Manwell, J. F., and Wright, S. (2006). Wind turbine acoustic noise. Renewable Energy Research Laboratory, Amherst: University of Massachusetts.

[۷] L.B. Tjernberg P. Wennerhag. (2012). Wind Turbine Operation and Maintenance Elforsk report 12:41. October; 2012.

[۸] Niknam, S. A., Thomas, T., Hines, J. W., and Sawhney, R. (2013). Analysis of acoustic emission data for bearings subject to unbalance. IJPHM Special Issue on Wind Turbine PHM (Color), 80.

[۹] Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Slaoui-Hasnaoui, F., Tameghe, T. A., and Ekemb, G. (2014). Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. Energies, 7(4), 2595-2630.

[۱۰] Sheng, S. (2013). Report on wind turbine subsystem reliability-a survey of various databases. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Tech. Rep. NREL/PR-5000-59111.





- [۱۱] Shakya, P., Darpe, A. K., and Kulkarni, M. S. (2013). Vibration-based fault diagnosis in rolling element bearings: ranking of various time, frequency and time-frequency domain data-based damage identification parameters. *International journal of condition monitoring*, 3(2), 53-62.
- [۱۲] Towsyfy, H., Raharjo, P., Gu, F., and Ball, A. (2013). Characterization of Acoustic Emissions from Journal Bearings for Fault Detection. *NDT 2013*.
- [۱۳] Oh, H., Shibutani, T., and Pecht, M. (2012). Precursor monitoring approach for reliability assessment of cooling fans. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2), 173-178.
- [۱۴] Elforjani, M., and Mba, D. (2011). Condition Monitoring of Slow-Speed Shafts and Bearings with Acoustic Emission. *Strain*, 47(s2), 350-363.
- [۱۵] Eftekharnjad, B., Carrasco, M. R., Charnley, B., and Mba, D. (2011). The application of spectral kurtosis on acoustic emission and vibrations from a defective bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(1), 266-284.
- [۱۶] Kilundu, B., Chiementin, X., Duez, J., and Mba, D. (2011). Cyclostationarity of Acoustic Emissions (AE) for monitoring bearing defects. *Mechanical systems and signal Processing*, 25(6), 2061-2072.
- [۱۷] Elforjani, M., and Mba, D. (2012). Detecting AE Signals from Natural Degradation of Slow Speed Rolling Element Bearings. In *Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations* (pp. 61-68). Springer Berlin Heidelberg.
- [۱۸] Nienhaus, K., Boos, F. D., Garate, K., and Balthes, R. (2012). Development of acoustic emission (AE) based defect parameters for slow rotating roller bearings. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 364, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.
- [۱۹] Sandoval, U., Pedraza Ramirez, C. A., and Quiroga Méndez, J. E. (2013). Acoustic emission-based early fault detection in tapered roller bearings. *Ingeniería e Investigación*, 33(3), 5-10.
- [۲۰] Niknam, S. A., Thomas, T., Hines, J. W., and Sawhney, R. (2013). Analysis of acoustic emission data for bearings subject to unbalance. *IJPHM Special Issue on Wind Turbine PHM (Color)*, 80.
- [۲۱] Jian, H., Lee, H. R., and Ahn, J. H. (2013). Detection of bearing/rail defects for linear motion stage using acoustic emission. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(11), 2043-2046.
- [۲۲] Jia, H., Wu, X., Liu, X., Liu, C., and Wang, Z. (2015). Analysis and Research of Acoustic Emission Signal of Rolling Element Bearing Fatigue. In *Advances in Acoustic Emission Technology* (pp. 157-166). Springer New York.
- [۲۳] Law, L. S., Kim, J., Liew, W. Y. H., and Lee, S. K. (2013). An approach to monitoring the thermomechanical behavior of a spindle bearing system using acoustic emission (AE) energy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(7), 1169-1175.
- [۲۴] Ali, Y. H., Omar, M. H., Rahman, R. A., and Hamzah, R. I. R. (2014). Acoustic Emission Technique In Condition Monitoring And Fault Diagnosis Of Gears And Bearings. *International Journal of Academic Research*, 6(5).
- [۲۵] Ruiz-Cárcel, C., Hernani-Ros, E., Cao, Y., and Mba, D. (2014). Use of spectral kurtosis for improving signal to noise ratio of acoustic emission signal from defective bearings. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 363-371.
- [۲۶] Chacon, J. L. F., Kappatos, V., Balachandran, W., and Gan, T. H. (2015). A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique. *Applied Acoustics*, 89, 88-100.
- [۲۷] Renaudin, L., Bonnardot, F., Musy, O., Doray, J. B., and Rémond, D. (2010). Natural roller bearing fault detection by angular measurement of true instantaneous angular speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(7), 1998-2011.



- [۲۸] Holweger, W., Walther, F., Loos, J., Wolf, M., Schreiber, J., Dreher, W., and Lutz, S. (2012). Non-destructive subsurface damage monitoring in bearings failure mode using fractal dimension analysis. *Industrial Lubrication and Tribology*, 64(3), 132-137.
- [۲۹] Neti, P., Zhang, P., Shah, M., and Younsi, K. (2012). Electrical signature analysis based online monitoring of drive-trains for doubly-fed wind generators. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1764-1769). IEEE.
- [۳۰] Whittle M, Trevelyan J, Tavner PJ. (2013). Bearing currents in wind turbine generators. *J Renew Sustain Energy*;5:053128.
- [۳۱] Harlişca, C., Szabó, L., Frosini, L., and Albini, A. (2013). Diagnosis of rolling bearings faults in electric machines through stray magnetic flux monitoring. In *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2013 8th International Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.
- [۳۲] Amirat, Y., Choqueuse, V., and Benbouzid, M. (2013). EEMD-based wind turbine bearing failure detection using the generator stator current homopolar component. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1), 667-678.
- [۳۳] Oberg, E. K., Dunleavy, C. S., Bourke, P., and Clyne, T. W. (2013). Electrical monitoring of crack propagation during quasi-static loading and ballistic impact of alumina plates. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(13), 2663-2675.
- [۳۴] Sheng, S. and Veers, P. (2011). Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring – An Overview. Presented at the Mechanical Failures Prevention Group: Applied Systems Health Management Conference 2011 Virginia Beach, Virginia. May 10 –12 .
- [۳۵] Romanenko, A., Ahola, J., Muetze, A., and Niskanen, V. (2014). Study of incipient bearing damage monitoring in variable-speed drive systems. In *Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on* (pp. 1-10). IEEE.
- [۳۶] Machado, C., Guessasma, M., Bellenger, E., Bourbatache, K., Bourny, V., and Fortin, J. (2014). Diagnosis of faults in the bearings by electrical measures and numerical simulations. *Mechanics and Industry*, 15(5), 383-391.
- [۳۷] Kim, S. Y., Ra, I. H., and Kim, S. H. (2012). Design of wind turbine fault detection system based on performance curve. In *Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), 2012 Joint 6th International Conference on* (pp. 2033-2036). IEEE.
- [۳۸] Uluyol, O., Parthasarathy, G., Foslien, W., and Kim, K. (2011). Power curve analytic for wind turbine performance monitoring and prognostics. In *Annual conference of the prognostics and health management society* (Vol. 2, pp. 1-8).
- [۳۹] Guo, P. (2012). Wind turbine generator bearing Condition Monitoring with NEST method. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2012 24th Chinese* (pp. 235-239). IEEE.
- [۴۰] Kusiak, A., and Verma, A. (2012). Analyzing bearing faults in wind turbines: A data-mining approach. *Renewable Energy*, 48, 110-116.
- [۴۱] Yang, W., Court, R., and Jiang, J. (2013). Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis. *Renewable Energy*, 53, 365-376.
- [۴۲] Astolfi, D., Castellani, F., and Terzi, L. (2014). Fault prevention and diagnosis through scada temperature data analysis of an onshore wind farm. *Diagnostyka*, 15.
- [۴۳] Shahriar, M. R., Wang, L., Kan, M. S., Tan, A. C., and Ledwich, G. (2015). Fault Detection of Wind Turbine Drivetrain Utilizing Power-Speed Characteristics. In *9th WCEAM Research Papers* (pp. 143-155). Springer International Publishing.



- [۴۴] Bai, X. Q., Xiao, H. L., and Zhang, L. (2011). The condition monitoring of large slewing bearing based on oil analysis method. In Key Engineering Materials (Vol. 474, pp. 716-719). Trans Tech Publications.
- [۴۵] Stadler, K. and Studenrauch, A. (2013). Premature bearing failures in wind gearboxes and white etching cracks (WEC). SKF Evol., March, 7.
- [۴۶] Dupuis, R. (2010). Application of oil debris monitoring for wind turbine gearbox prognostics and health management. In Annual Conference of the prognostics and health management society (p. 10).
- [۴۷] Jiang, X. F., Liu, F., and Zhao, P. C. (2012). Gearbox Non-Ferrous Metal Bearing Wear Condition Monitoring Based on Oil Analysis. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 164, pp. 73-76). Trans Tech Publications.
- [۴۸] Ziani R, Zagadi R, Felkaoui A, Djouada M. Bearing Fault Diagnosis Using Neural Network and Genetic Algorithms with the Trace Criterion. Condition Monit Mach Non-Station Operat 2012:89-96.
- [۴۹] Miao, Q., Cong, L., and Pecht, M. (2011). Identification of multiple characteristic components with high accuracy and resolution using the zoom interpolated discrete Fourier transform. Measurement science and technology, 22(5), 055701.
- [۵۰] Jayaswal, P., and Agrawal, B. (2011). New trends in wind turbine condition monitoring system. Int JEmerg Trends Eng Dev, 3(1), 133-48.
- [۵۱] Abdusslam, S., Ahmed, M., Raharjo, P., Gu, F., and Ball, A. D. (2011). Time encoded signal processing and recognition of incipient bearing faults. In Automation and Computing (ICAC), 2011 17th International Conference on (pp. 289-293). IEEE.
- [۵۲] Waters, N., Beaujean, P. P., and Vendittis, D. J. (2013). Targeting faulty bearings for an ocean turbine dynamometer. IJPHM Special Issue on Wind Turbine PHM (Color), 139.
- [۵۳] Kumar, H. S., Pai, P. S., Sriram, N. S., and Vijay, G. S. (2013). ANN based evaluation of performance of wavelet transform for condition monitoring of rolling element bearing. Procedia engineering, 64, 805-814.
- [۵۴] Sun, W., An Yang, G., Chen, Q., Palazoglu, A., and Feng, K. (2013). Fault diagnosis of rolling bearing based on wavelet transform and envelope spectrum correlation. Journal of Vibration and Control, 19(6), 924-941.
- [۵۵] Li, W., Huang, Z., Lin, H., and Ding, K. (2013). Envelope analysis by wavelet-filter based spectral kurtosis for bearing health monitoring. In Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International (pp. 1721-1724). IEEE.
- [۵۶] Keller, J., McDade, M., LaCava, W., Guo, Y., and Sheng, S. (2012). Gearbox reliability collaborative update. US National Renewable Energy Laboratory (NREL) report PR-5000-5455.
- [۵۷] Zhao, M., Lin, J., Xu, X., and Lei, Y. (2013). Tachless envelope order analysis and its application to fault detection of rolling element bearings with varying speeds. Sensors, 13(8), 10856-10875.
- [۵۸] Sun, H., Zi, Y., and He, Z. (2014). Wind turbine fault detection using multiwavelet denoising with the data-driven block threshold. Applied Acoustics, 77, 122-129.
- [۵۹] Liang, M., and Faghidi, H. (2014). Intelligent bearing fault detection by enhanced energy operator. Expert Systems with Applications, 41(16), 7223-7234.
- [۶۰] Unal, M., Onat, M., Demetgul, M., and Kucuk, H. (2014). Fault diagnosis of rolling bearings using a genetic algorithm optimized neural network. Measurement, 58, 187-196.
- [۶۱] Dybała, J., and Zimroz, R. (2014). Rolling bearing diagnosing method based on empirical mode decomposition of machine vibration signal. Applied Acoustics, 77, 195-203.
- [۶۲] Dalvand, F., Kalantar, A., Shokoochi, S., and Bevrani, H. (2014). Time-domain bearing condition monitoring in induction motors using instantaneous frequency of motor voltage. In Smart Grid Conference (SGC), 2014 (pp. 1-7). IEEE.





- [۶۳] Ahn, J. H., Kwak, D. H., and Koh, B. H. (2014). Fault detection of a roller-bearing system through the EMD of a wavelet denoised signal. *Sensors*, 14(8), 15022-15038.
- [۶۴] Zimroz, R., Bartelmus, W., Barszcz, T., and Urbanek, J. (2014). Diagnostics of bearings in presence of strong operating conditions non-stationarity—a procedure of load-dependent features processing with application to wind turbine bearings. *Mechanical systems and signal processing*, 46(1), 16-27.
- [۶۵] Wang, T., Liang, M., Li, J., and Cheng, W. (2014). Rolling element bearing fault diagnosis via fault characteristic order (FCO) analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 45(1), 139-153.
- [۶۶] Khanam, S., Tandon, N., and Dutt, J. K. (2014). Fault size estimation in the outer race of ball bearing using discrete wavelet transform of the vibration signal. *Procedia Technology*, 14, 12-19.
- [۶۷] Wind Energy Update. 7th annual wind Energy Operations and Maintenance Dallas Summit. Texas, USA, 14-15 April 2015.
- [۶۸] Saidi, L., Ali, J. B., and Fnaiech, F. (2015). Application of higher order spectral features and support vector machines for bearing faults classification. *ISA transactions*, 54, 193-206.
- [۶۹] Zarei, J., Tajeddini, M. A., and Karimi, H. R. (2014). Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter. *Mechatronics*, 24(2), 151-157.
- [۷۰] Ali JB, Fnaiech N, Saidi L, Chebel-Morello B, and Fnaiech F. (2015). Application of empirical mode decomposition and artificial neural network for automatic bearing fault diagnosis based on vibration signals.;89:16– 2701.
- [۷۱] Márquez, F. P. G. Tobias, A. M. Pérez, J. M. P., and Papaelias, M. (2012). Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable Energy*, 46, 169-178.
- [۷۲] Sharma S, Mahto D. (2013). Condition Monitoring of Wind Turbines: A Review. *International Journal of Scientific Engineering Research* 2013;Volume 4(Issue 8) ISSN 2229-5518.