

A review of non-destructive inspection techniques inspection for wind turbine blades

Majid Mirzaee¹  |

1. Nonmetal group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: mjmirzaei@nri.ac.ir

ABSTRACT

Article Information:

Research Article

Received 16 July 2024

Revised 15 Sep. 2024

Accepted 17 Oct. 2024

Keywords:

Wind Turbine Blades,
Acoustic emission,
Vibration,
Thermography,
Machine vision.

Blades play a vital role in the performance of wind turbine systems. However, they are prone to damage from complex and irregular loading, which can lead to catastrophic degradation and costly maintenance. Defects or damage to wind turbine blades (WTBs) not only reduce the lifetime and efficiency of wind turbine electricity generation but also increase monitoring errors, safety hazards, and maintenance costs. Therefore, damage detection for WTBs is of high importance for preventing failures, planning maintenance, and ensuring the operational stability of wind turbines. This review article provides a comprehensive overview of advanced damage detection techniques for WTBs, including many updated methods based on strain measurement, acoustic emission, ultrasound, thermography, and machine vision. With the development of machine vision approaches and image processing technology, machine vision-based detection has become a promising and primary technique for detecting surface damage and measuring the deformation of WTBs [28] due to its low cost, ease of operation, and no need for prior knowledge about damage locations. In this review article, common damages to WTBs are introduced comprehensively at first. In the second stage, the principles of detection, development methods, advantages, and disadvantages of the aforementioned techniques for blade inspection are examined. The trend in damage detection in wind turbines is moving towards methods that offer full capabilities, long-range, contactless, non-destructive, wireless, and online monitoring. Timely detection of blade damage and continuous assessment of the structural health of wind turbines are increasingly important. This review article proposes a new idea for the design and integration of energy harvesters and WTB damage detection methods, in which the devices are automatic and wireless. Finally, potential research directions, and WTB damage detection techniques through comparative analysis, are reviewed and concluded. This review is expected to provide guidelines for practical WTB inspections as well as research perspectives for damage detection techniques.

Cite this article: Mirzaee, M. (2024). A review of non-destructive inspection techniques inspection for wind turbine blades. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 68-85.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.473613.1150>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

مروری بر تکنیک‌های بازرسی غیرمخرب برای پره‌های توربین بادی

مجید میرزایی^۱^۱ گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، رایانامه: mjmirzaei@nri.ac.ir

چکیده:

پره‌ها نقش حیاتی در عملکرد سیستم توربین بادی دارند. با این حال، آنها مستعد آسیب ناشی از بارگذاری پیچیده و نامنظم هستند که باعث تخریب فاجعه‌بار می‌شوند و نگهداری از آنها پرهزینه است. نقص یا آسیب به پره‌های توربین بادی (WTB) نه تنها طول عمر و راندمان تولید برق توربین بادی را کاهش می‌دهد، بلکه باعث افزایش خطاهای نظارتی، خطرات ایمنی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. بنابراین، تشخیص آسیب WTBها برای جلوگیری از خرابی، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری و پایداری عملیات توربین‌های بادی از اهمیت بالایی برخوردار است. این مقاله مروری جامع از تکنیک‌های پیشرفته تشخیص آسیب WTBها، از جمله بسیاری از روش‌های به روز شده مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش، نشر آوایی، روش فراصوتی، ارتعاش، دمانگاری و بینایی ماشین را ارائه می‌کند. با توسعه رویکردهای بینایی ماشین و پردازش تصویر، فناوری تشخیص مبتنی بر بینایی ماشین به یک تکنیک امیدوارکننده و اصلی برای تشخیص آسیب سطحی و اندازه‌گیری تغییر شکل WTBها بدلیل کم‌هزینه بودن، کارکرد آسان و عدم نیاز به دانش قبلی در مورد موقعیت‌های آسیب تبدیل می‌شود. در این مقاله مروری ابتدا، به آسیب‌های معمولی WTBها به طور جامع معرفی می‌شوند. در مرحله دوم، اصول تشخیص، روش‌های توسعه، مزایا و معایب تکنیک‌های فوق‌الذکر برای بازرسی پره‌ها بررسی می‌شوند. روند تشخیص آسیب در توربین‌های بادی به سمت روش‌هایی است که قابلیت‌های کامل، دوربرد، بدون تماس، غیرمخرب، بی‌سیم و نظارت آنلاین را دارند. تشخیص به موقع آسیب‌های پره و ارزیابی مستمر سلامت ساختاری توربین‌های بادی از اهمیت روزافزونی برخوردار است. این مقاله مروری به یک ایده جدید برای طراحی و ادغام برداشت‌کننده‌های انرژی و روش‌های تشخیص آسیب WTB، که در آن دستگاه‌ها به صورت خودکار و بی‌سیم هستند، پیشنهاد می‌کند. در نهایت، جهت‌های تحقیقاتی بالقوه، تکنیک‌های تشخیص آسیب WTB را از طریق تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای مورد بررسی قرار داده و نتیجه‌گیری می‌شود. انتظار می‌رود که این بررسی دستورالعمل‌هایی را برای بازرسی‌های عملی WTB و همچنین چشم‌اندازهای تحقیقاتی برای تکنیک‌های تشخیص آسیب را ارائه کند.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۲۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

کلیدواژگان:

پره‌های توربین بادی،

نشر آوایی،

ارتعاش،

دمانگاری،

بینایی ماشین.

استناد: نام خانوادگی، مجید. (۱۴۰۲). مروری بر تکنیک‌های بازرسی غیرمخرب برای پره‌های توربین بادی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۶۸-۸۵.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/Doi: 10.30494/jndt.2024.473613.1150>

۱- مقدمه

انرژی باد یکی از مهم‌ترین منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر است که می‌تواند به انرژی الکتریکی برای منابع برق صنعتی و مصرف برق خانگی تبدیل شود. در سال ۲۰۱۲، انرژی باد ۱۱ درصد از کل تولید انرژی‌های تجدیدپذیر را تشکیل می‌داد که نشانه رقابت ملی است [۱]. با افزایش ظرفیت نصب انرژی بادی جهانی به ۵۳۹ گیگاوات در سال ۲۰۱۷ و روند افزایش اندازه WTB، چالش‌های سختگیرانه‌ای بر روی تشخیص آسیب آنها و نظارت بر سلامت سازه (SHM¹) تحمیل شده است، به طوری که ۱۹/۴٪ از تمام حوادث توربین بادی در سال ۲۰۱۲ به خرابی پره‌ها نسبت داده شد [۲، ۳]. پره‌ها اجزای کلیدی و حیاتی یک سیستم تولید برق توربین بادی هستند که در شرایط سخت کار می‌کنند و نیروی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. آنها تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد کلی توربین بادی دارند و ساخت (۱۵-۲۰٪ از کل هزینه) و نگهداری آنها در مقایسه با سایر اجزاء پرهزینه‌تر است [۴]. مواد کامپوزیت، مانند کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP²) که اغلب برای ساخت WTB استفاده می‌شود، معمولاً در WTBها برای کاهش هزینه و وزن عمومی و بهبود استحکام، مقاومت در برابر آسیب، عمر خدمات استفاده می‌شود. نقص یا آسیب بر روی WTBها ناشی از نقص تولید، باد متلاطم، رعد و برق، بارگذاری نامنظم و غیره، ممکن است منجر به تغییرات سطحی شود که بر کارایی آیرودینامیک پره تأثیر می‌گذارد که به خود توربین بادی یا توربین‌های مجاور آسیب می‌رساند و حتی خطر ایمنی را برای اپراتورهای انسانی ایجاد می‌کند، که در نتیجه‌ی آن ممکن است منجر به از دست دادن توان، هزینه‌های نگهداری بالا شود [۵]. در این مقاله مروری در بخش ۲، عیوب یا آسیب‌های معمولی WTBها در هنگام کار معرفی می‌شوند. در بخش ۳، تکنیک‌های تشخیص برای بازرسی آسیب بر اساس اندازه‌گیری کرنش، نشر آوایی، روش فراصوتی، ارتعاش، دمانگاری و بینایی ماشین بررسی می‌شوند. علاوه بر این، اصول تشخیص، روش‌های توسعه، جوانب مثبت و منفی هر تکنیک بررسی می‌شود. انواع آزمون‌های غیرمخرب دیگر به همراه مزایا و معایب هر روش در بخش ۴ بیان

می‌شود. جهت‌های تحقیقاتی احتمالی بازرسی WTB در بخش ۵ مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ ارائه شده است.

۲- آسیب‌های معمولی WTBs

آسیب به پره توربین بادی می‌تواند به دلایل مختلفی در حین کار مداوم باشد، مانند باد، بارندگی شدید، برخورد صاعقه، تجمع یخ، استحکام ناکافی مواد پره، بارهای خستگی، خطاهای شخصی در هنگام ساخت، نصب و غیره باشد. صدمات باعث کاهش تولید توان ناشی از کاهش بازده آیرودینامیکی و کاهش طول عمر می‌شود [۶]. در همین حال، آنها همچنین نویز تولید شده از بی‌نظمی‌های سطح پره را افزایش می‌دهند، و خطاهای نظارتی، خطرات ایمنی و موارد دیگر را هم افزایش می‌دهند. وقوع خسارات WTB ناشی از عوامل محیطی شدید مانند رعد و برق، بارندگی‌های شدید و بادهای شدید ۷۶ درصد از کل خسارت‌ها را تشکیل می‌دهد. به طور جزئی، صاعقه به ویژه در قسمت بیرونی پره توربین آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه شدن، جدا شدن پوسته را ایجاد می‌کند [۷]. باد شدید باعث شکستگی یا شکست پره می‌شود. تجمع یخ باعث چرخش نامتعادل، از دست دادن آیرودینامیک، توقف ناخواسته، و افزایش خستگی پره و خطرات ایمنی می‌شود. پره‌های توربین که در هوای بسیار سرد کار می‌کنند ممکن است از شکستگی مواد ترد و یخ زدن پره‌ها و حسگرها دچار از کارافتادگی شوند [۸]. بنابراین، هرچه زودتر آسیب‌ها شناسایی شوند، انتظار می‌رود هزینه‌های نگهداری کمتر شود. آسیب‌های معمولی که روی پره‌های توربین ظاهر می‌شوند شامل ترک‌ها (افزایش زبری سطح)، جداشدگی پوسته/چسب و جداشدگی پوسته/چسب ناشی از کمانش (از دست دادن توانایی مواد برای چسبیدن به یکدیگر است)، شکست اتصال چسب بین پوسته‌ها، لایه لایه شدن (کاهش سفتی پره)، شکستن الیاف، لایه‌برداری بین لایه‌ها، فرسایش لبه و غیره است. مشاهده می‌شود که ترک‌ها، لایه لایه شدن، و جداشدگی از انواع متداول آسیب هستند [۹]. با تخریب ناشی از خستگی بر روی پره‌های توربین، ترک‌ها در بدنه پره ظاهر می‌شوند و سپس به سرعت منتشر

² Fiber-reinforced Polymer¹ Structural health monitoring

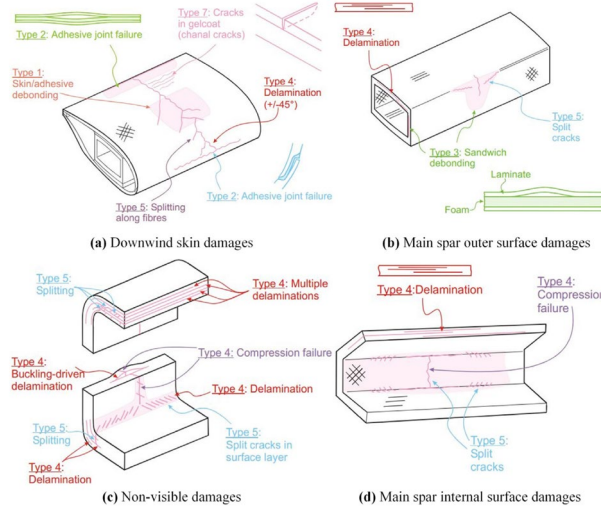
۳-۱- اندازه‌گیری کرنش

روش‌های تشخیص مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش برای تشخیص تغییرات جزئی در طول یا تغییر شکل پره‌های توربین با استفاده از حسگرهای کرنش استفاده می‌شوند. ساختارهای پره‌ای تحت بارهای اعمال شده تغییر شکل می‌دهند و تغییر شکل را می‌توان با تشخیص کرنش به دست آورد. کرنش مستقیم و کرنش برشی در بازرسی WTB تعریف و استفاده می‌شود. کرنش مستقیم به صورت $\epsilon = x/l$ و کرنش برشی به صورت $\gamma = x/d$ تعریف می‌شود که در آن تعاریف دو نوع کرنش در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۱]. حسگرهای کرنش اغلب بر روی سطح نصب می‌شوند یا در لایه‌های پره تعبیه می‌شوند، که می‌توانند به طور غیرمستقیم آسیب‌های ساختاری در WTB‌ها را از طریق انبساط یا انقباض پره ناشی از دما یا تغییرات کرنش تشخیص دهند [۱۲]. علاوه بر این، اندازه‌گیری کرنش این مزیت را دارد که می‌تواند به طور مداوم پره توربین را برای دوره‌های زمانی طولانی نظارت کند، اما دقت و حساسیت اندازه‌گیری کرنش به فاصله بین محل حسگر و آسیب بستگی دارد. کرنش‌سنج‌ها، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اغلب برای نظارت بر کرنش پره به منظور جلوگیری از تنش زیاد و تشخیص آسیب استفاده می‌شوند. تخمین طول عمر پره با استفاده از اندازه‌گیری کرنش در موقعیت‌های مشخص شده و تصمیم‌گیری برای خاموش شدن برای تعمیر و نگهداری یا جایگزینی امکان‌پذیر است [۱۳]. با این حال، کرنش‌سنج‌ها به راحتی در طول عملیات طولانی مدت به دلیل خستگی یا خزش از کار می‌افتند. فیبر براگ گریٹینگ^۱ (FBGs)، که اصل آن در شکل ۴ نشان داده شده است، معمولاً برای فیبرهای نوری با ضریب شکست دوره‌ای اعمال می‌شود و می‌تواند کرنش و دما را به طور همزمان کنترل کند. طول موج براگ، λ_B ، برای بازتاب مستقیم کرنش استفاده می‌شود و می‌توان آن را با معادله (۱) محاسبه کرد [۱۴] و تغییر طول موج براگ، $\Delta\lambda_B$ ، را می‌توان با معادله (۲) بیان کرد [۱۵].

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B ((\alpha + \epsilon)\Delta T + (1 - \nu_e)\Delta\epsilon) \quad (2)$$

می‌شوند یا حتی کل ساختار را از بین می‌رود. آسیب‌های معمولی WTB‌ها در جدول ۱ فهرست و در شکل ۱ نشان داده شده است. آسیب‌ها اغلب در نواحی مختلف پره توزیع می‌شوند، اما بخش ریشه پره و اتصال باند/جوش محتمل‌ترین مکان‌های آسیب دیده هستند.



شکل ۱) طرحی که برخی از انواع آسیب معمولی WTB‌ها را نشان می‌دهد [۱۰].

جدول ۱) انواع آسیب معمولی برای WTB [۱۰]

شماره	نوع تخریب برای WTB	داخلی / خارجی
۱	جداشدگی پوسته/چسب یا جداشدگی لایه چسبی از تیر اصلی	خارجی
۲	شکست اتصال چسبیده بین پوسته‌ها	خارجی
۳	جداشدگی رویه پانل ساندویچی	خارجی
۴	لایه لایه شدن ناشی از بار کششی یا بار خمشی	داخلی
۵	شکست الیاف در کشش، شکست لمینیت در فشار	داخلی/خارجی
۶	جداشدگی پوسته/چسب ناشی از خمش	خارجی
۷	ترک خوردگی یا جداشدگی پوشش زل	خارجی

۳- تکنیک‌های تشخیص آسیب

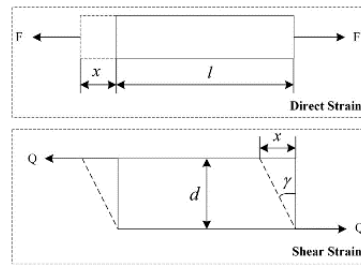
¹ Fiber Bragg Gratings

جدول ۲ به اختصار آورده شده‌اند.

جدول ۲) مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر اندازه

گیری کرنش [۱۳]

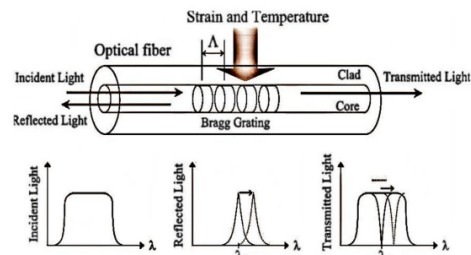
شماره	مزایا	معایب
۱	تشخیص تغییرات ساختاری جزئی در تیغه و کارایی برای تشخیص خطاهای اولیه	نتایج دقیق وابسته به تماس حسگرهای کششی و مواد تحت نظر
۲	نیاز به نرخ‌های نمونه‌برداری پایین‌تر	افزایش پیچیدگی سیستم
۳	مستقل بودن از منابع تغذیه خارجی	نیاز به دانش قبلی در مورد نواحی با کرنش زیاد
۴	محدودیتی مربوط به زمان و فاصله انتقال سیگنال نسبت به تخریب سیگنال وجود ندارد	مستعد از کارافتادگی به دلیل خزش، تجزیه یا خستگی و وابستگی شدید به قابلیت اطمینان حسگر
۵	دسترس بودن برای نظارت مستمر و پیش‌بینی عمر در حین عملیات	نیاز به مقادیر زیادی از حسگرها چون یک حسگر تنها یک نقطه را اندازه‌گیری می‌کند



شکل ۲) تعاریف دو نوع کرنش [۱۱]



شکل ۳) کرنش سنج [۱۱]



شکل ۴) گریٹینگ فیبر براگ [۱۴]

۳-۲- نشر آوایی

روش‌های تشخیصی که بر پایه نشر آوایی هستند، بر روی شناسایی سیگنال‌های الکتریکی تمرکز دارند که از موج‌های الاستیک موقتی حاصل می‌شوند؛ این موج‌ها به دنبال آزادسازی انرژی ناشی از شروع آسیب، گسترش ترک یا تغییر شکل پلاستیکی به وجود می‌آیند. اصول کار تشخیص نشر آوایی در شکل ۵ نمایش داده شده است. آسیب‌دیدگی باعث ایجاد انفجاری از انرژی می‌شود که امواج صوتی با فرکانس بالا را در درون ساختار پره تولید کرده و می‌توان با استفاده از حسگرهای نشر آوایی آن‌ها را ردیابی کرد. اطلاعات مربوط به وقوع، فرآیند گسترش و شکست پره می‌تواند از طریق ویژگی‌های موج‌شکل نشر آوایی مانند دامنه، انرژی، زمان صعود، مقدار میانگین مربعات (RMS) و غیره استخراج شود [۱۵]. این تکنولوژی به رصد تغییرات میکروساختاری در مواد پره‌های توربین بادی (WTBS) می‌پردازد که ممکن است به دلیل خستگی، ترک‌خوردگی، کاهش سفتی و افزایش زبری

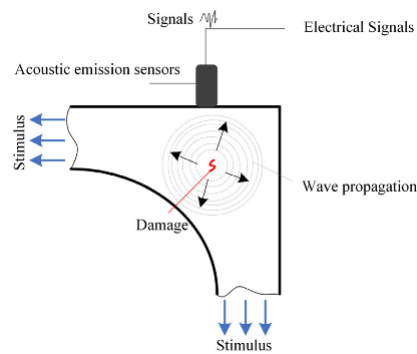
با اینکه حسگرهای فیبر نوری دارای مزایایی نظیر حساسیت بالا، ابعاد کوچک، وزن سبک، مقاومت بالا در برابر خستگی، دامنه دمایی گسترده برای کاربرد و قابلیت تعبیه در مواد کامپوزیتی هستند، استفاده از آن‌ها در نظارت بر WTBS به دلیل هزینه‌های بیشتر محدود شده است. حسگرهای فیبر نوری برای اندازه‌گیری پیوسته کرنش، به‌ویژه برای WTBS، بسیار امیدبخش هستند، اما همچنان گران‌قیمت، نصب آن‌ها وقت‌گیر است و نیازمند دانش پیشین درباره میدان‌های تنش بالا می‌باشند. تکنیک‌های تشخیص مبتنی بر سنجش کرنش برای پایش مستمر پره‌های در حال چرخش موجود است و تحقیقات به سمت روش‌هایی با هزینه پایین، دقت بالا، بی‌سیم، تشخیص الگو و سایر موارد گرایش دارند. مزایا و معایب این فناوری تشخیص مبتنی بر سنجش کرنش در

بو^۱ و همکاران [۱۸] با به‌کارگیری روش جداسازی کور دکانولوژی^۲، ارتباط بین وضعیت خستگی و سیگنال‌های نشر آوایی ماده‌ای را از آزمایش خستگی WTB کشف کردند، که در آن ترک به صورت مصنوعی و عرضی ایجاد شده بود. لی و همکاران با استفاده از امواج لمب و مبدل‌های پیزوالکتریک نصب شده بر ریشه پره توربین، تشخیص ترک‌های عرضی را ممکن ساختند، که در آن بازسازی پراکنده برای تعیین مکان و الگوریتم تعقیب پراکنده برای شناسایی گسترش ترک عرضی مصنوعی به کار رفته بود. علاوه بر این، لی و همکاران [۱۹] روشی برای بهینه‌سازی پراکنده آرایه حسگرها در ساختارهای لمینیت کامپوزیتی پیشنهاد دادند که هدف آن کاهش تعداد مبدل‌ها بود، ولی دقت همچنان تضمین شده بود. اما برای اینکه حسگرها بتوانند دقیقاً در کنار محل آسیب‌های پره‌های توربین بادی (WTB) قرار بگیرند، لازم است که تعداد زیادی حسگر نشر آوایی نصب شوند. مشکل اینجاست که بین سیگنال‌های صوتی که از آسیب‌ها منتشر می‌شوند و خود آسیب‌ها، هیچ پیوند فیزیکی مستقیمی وجود ندارد. برای جمع‌آوری داده‌ها، به سیستمی با قابلیت ثبت داده‌ها در فرکانس‌های بسیار بالا نیاز است و جدا کردن سیگنال‌های مفید از سروصدای محیطی کاری بسیار سخت است که هزینه‌های پردازش داده‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. همچنین، این روش نمی‌تواند اطلاعاتی درباره‌ی فشارهای ساختاری درونی توربین‌های بادی (WTBs) به ما بدهد. در کل، سیستم تشخیصی که بر اساس نشر آوایی برای بازرسی WTB‌ها استفاده می‌شود، پیچیده و قطعاً هزینه‌بر است. جدول ۳ مزایا و معایب این فناوری تشخیصی را نشان می‌دهد. بزرگ‌ترین چالش این تکنیک، تفکیک سیگنال‌های صوتی ناشی از آسیب‌ها از سیگنال‌هایی است که به خاطر سر و صدا ایجاد می‌شوند.

جدول ۳ مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر نشر آوایی [۲۰]

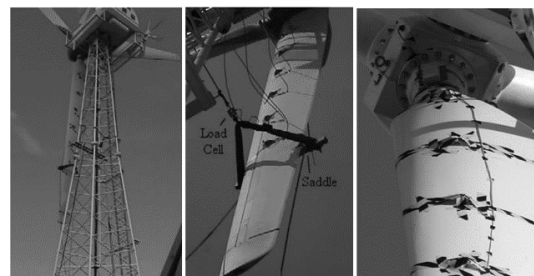
شماره	مزایا	معایب
۱	فرکانس‌هایی بالاتر، از ۵۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز	باید بر روی پره‌ها نصب شوند
۲	حساسیت بالایی به انواع	نیازمند به کارگیری

سطح و سایر عوامل بدون نیاز به تحریک خارجی ایجاد شوند. با بررسی داده‌های نشر آوایی، می‌توان به تخمین زدن شدت آسیب‌ها پرداخت. این روش به سرعت در حال تبدیل شدن به یک روش محبوب برای نظارت بر مواد یا ساختارها از زمان بروز نقص تا لحظه شکست است و به عنوان یک روش تشخیص مؤثر برای پایش گسترش آسیب‌ها، و همچنین ارزیابی زمان وقوع، مکان و شدت آسیب‌ها در WTBs در حین کارکرد اثبات شده است. این تکنیک مزایایی چون سرعت بالا، کارآمدی، عدم تهاجم و تشخیص زود هنگام تر آسیب‌ها نسبت به تکنولوژی‌های مبتنی بر ارتعاش را دارد و به شدت با تکنیک‌های مبتنی بر ارتعاش مرتبط است. تکنولوژی مبتنی بر نشر آوایی معمولاً در مناطق حساس و فصل مشترک‌های سطحی WTB که اغلب آسیب‌ها در آن‌ها رخ می‌دهد، به کار گرفته می‌شود تا شکست‌ها و مکان آسیب‌ها در پره‌های توربین شناسایی شوند [۱۶].



شکل ۵ اصل تشخیص نشر آوایی [۱۵]

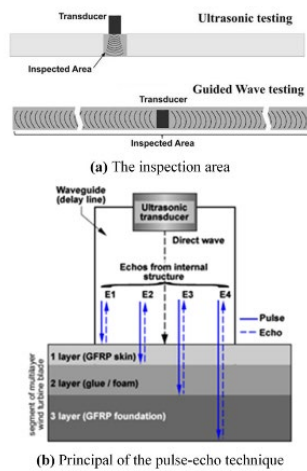
نحوه نصب و استفاده از تکنیک مبتنی بر نشر آوایی در شکل ۶ آورده شده است. حسگرهای نشر آوایی باید بر روی پره نصب شده و به طور دوره‌ای و مکرر سلامت پره را تحت بارهای سنگین نظارت کنند.



شکل ۶ تشخیص مبتنی بر نشر آوایی یک WTB ثابت در حال سرویس [۱۷].

² blind deconvolution separation method

¹ Bo



تعداد زیادی حسگر	مختلف خسارت‌ها	
پیچیدگی پردازش داده‌ها به دلیل فرکانس‌های بالا	قابلیت استفاده برای نظارت مستمر و کشف به موقع خرابی‌ها	۳
افزایش پیچیدگی سیستم و هزینه‌های گزاف	امکان نمایش و مکان‌یابی دقیق آسیب‌ها	۴
کاهش سیگنال که اجتناب‌ناپذیر است	نسبت سیگنال به نویز قابل توجه‌ای بالا	۵

۳-۳- روش فراصوتی

روش‌های تشخیصی که بر اساس روش فراصوتی کار می‌کنند، امواج بازتابی را که از آسیب‌ها برگشت می‌کنند، هنگامی که امواج فراصوت از میان مواد عبور کرده و از سطح مقابل دریافت می‌شوند، شناسایی می‌کنند [۲۱]، همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود. تکنولوژی فراصوت یکی از رایج‌ترین روش‌های آزمایش غیرمخرب (NDT) در صنعت به شمار می‌رود. این روش به انتشار و بازتاب امواج الاستیک در داخل پره‌ها وابسته است. بسته به تفاوت‌های ماده یا ساختار، الگوهای خاصی از بازتاب، جذب، رزونانس و انتقال به دست می‌آیند و از این طریق می‌توان اندازه، مکان و سایر جزئیات آسیب را ارزیابی کرد. از تکنولوژی فراصوت به طور وسیعی برای کشف آسیب‌های درونی ساختار استفاده شده است [۱۶]. این روش قادر است آسیب‌هایی با طول چند میلی‌متر را تشخیص دهد. زمان انتقال مکان آسیب را نشان می‌دهد و دامنه برای سنجش شدت آسیب به کار می‌رود [۲۲]. اطلاعات دقیق‌تری از آسیب نیز می‌توان با استفاده از تکنولوژی فراصوت به دست آورد، اما موفقیت آن به دلیل پیچیدگی‌های پردازش سیگنال، زمان طولانی جمع‌آوری و نیاز به تماس با سطح، محدود شده است. این مشکلات استفاده از آن برای بازرسی توربین‌های بادی (WTBS) یا سایر قطعات بزرگ را محدود می‌کند.

شکل ۷) نواحی اصلی و بازرسی تکنیک مبتنی بر روش فراصوتی برای WTBSها (الف) ناحیه بازرسی [۲۳]، (ب) تکنیک پالس اکو [۲۱] (GFRP). پلاستیک تقویت شده با الیاف شیشه‌ای).

امواج التراسونیک هدایت‌شونده^۱ (UGW) نوعی از امواج الاستیک هستند که برای شناسایی آسیب‌های ساختاری به کار می‌روند، که شامل تعیین مکان، نوع و شدت آسیب می‌شود. این روش یکی از موثرترین و قابل اطمینان‌ترین تکنیک‌ها به شمار می‌رود. پارک و همکاران [۲۴] روشی را با استفاده از اسکن فراصوت غیرتماسی و فیلتر امواج ایستا برای شناسایی لایه‌بندی و جداشدگی‌های پنهان در ساختارهای کامپوزیتی ارائه دادند. یه و همکاران [۲۵] یک سیستم آزمایش غیرمخرب خودکار را با استفاده از روش فراصوتی پالس-اکو برای بازرسی آسیب‌های داخلی WTBS در محل توسعه دادند. حبیبی و همکاران [۲۶] امواج UGW را با ارتعاشات فرکانس پایین ترکیب کردند تا یخ‌ها را از روی سطح پره‌های کامپوزیتی بردارند. جیمینز^۲ و همکاران [۲۷] با به کارگیری پردازش سیگنال (روش تبدیل موجک^۳) و یادگیری ماشین^۴ (تشخیص الگو) با امواج هدایت‌شونده، شناسایی و تشخیص سطوح کثیفی و گل در WTBS را به کار بردند. علاوه بر این، جیمینز و همکاران برای شناسایی سطوح متمایز تجمع یخ در WTBS از طبقه‌بندی‌کننده‌های یادگیری ماشینی بر روی سیگنال‌های فراصوت استفاده کردند. ثابت شده است که فناوری فراصوت برای یخ زدایی پره‌ها موثر و کارآمد است. با مزایای سرعت بالای اسکن، وضوح خوب و قابلیت‌های

³ Wavelet transforms

⁴ Machine learning

¹ Ultrasonic Guided Waves

² Jiménez

از روش‌های هوشمند انجام دهد تا اطمینان از عملکرد قابل اعتماد WTBها را فراهم کند [۲۹]. این روش به طور وسیعی در نظارت بر ماشین‌آلات دوار استفاده شده است. حسگرهای ارتعاش معمولاً بر روی سطوح WTBها نصب می‌شوند. حسگرهای جابجایی، حسگرهای سرعت و شتاب‌سنج‌ها اصلی‌ترین انواع حسگرها برای ثبت سیگنال‌های ارتعاشی هستند. فرکانس‌ها از محدوده‌های پایین، متوسط و بالا متغیر است و در حسگرهای ارتعاشی متناسب با آن‌ها استفاده می‌شوند. به دلیل دامنه وسیع فرکانسی، شتاب‌سنج‌ها برای بازرسی WTBها به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. تکنیک‌های پردازش سیگنال مانند تحلیل فرکانس، تحلیل زمان و تحلیل زمان-فرکانس، برای به دست آوردن سیگنال‌های متفاوت جهت شناسایی آسیب‌های WTB بسیار حیاتی هستند [۳۰]. درویلینس^۱ و همکاران [۳۱] از داده‌های پاسخ ارتعاشی برای یک سیستم شناسایی الگو بر روی پره‌ای به طول ۹ متری CX-100 برای شناسایی آسیب‌های پره استفاده کردند. اسکریمپاس^۲ و همکاران [۳۲] از داده‌های ارتعاش جانبی از بستر^۳ و کاهش عملکرد تولید انرژی برای شناسایی تجمع یخ استفاده کردند و از ۱۳ توربین بادی برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی بهره گرفتند. اولریکسن^۴ و همکاران [۳۳] یک روش شناسایی آسیب بر اساس شکل‌های مودال ساختاری با تحلیل مودال و موجک را برای شناسایی مکان‌یابی جداشدگی لبه پسین به طول ۱/۲ متر بر روی پره‌ای به طول ۳۴ متر مطالعه کردند. اولیویرا^۵ و همکاران [۳۴] سیستمی برای نظارت بر ارتعاشات با استفاده از خصوصیات مودال ارائه دادند که قادر به ردیابی آسیب‌های پره‌ها در توربین‌های بادی ساحلی و دریایی است. کولون^۶ و همکاران [۳۵] روشی را معرفی کردند که صرفاً بر پایه فرکانس‌های سیگنال برای شناسایی تغییرات جرم در WTBها استوار است و از رویکرد شناسایی الگوی آماری استفاده می‌کند. هول و همکاران با در نظر گرفتن ضرایب مدل خودرگرسیون به عنوان ویژگی‌های نشان‌دهنده آسیب، به نظارت بر سلامت ساختاری WTBها پرداختند تا قابلیت شناسایی زودهنگام آسیب‌ها را

تشخیص عیب، می‌توان به مکان، جهت، اندازه و سایر ویژگی‌های آسیب دست یافت [۲۸]. مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر روش فراصوتی در جدول ۴ فهرست شده است.

جدول ۴) مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر روش فراصوتی [۲۸]

شماره	مزایا	معایب
۱	به شکل وسیعی برای تشخیص آسیب‌های درونی سازه‌ها مانند جداشدگی لایه‌ها و جداشدگی چسبندگی به کار می‌رود	برای تشخیص لایه‌ها، دقت تصویر برای مشخص کردن موقعیت دقیق کافی نیست
۲	امکان تعیین مکان، عمق و شدت آسیب وجود دارد	نیاز به برقراری ارتباط مستقیم با سطح و زمان زیادی برای جمع‌آوری اطلاعات دارد که فرآیندی زمان‌بر است
۳	برای شناسایی عیوب ریز مناسب است	پردازش سیگنال‌ها پیچیدگی زیادی دارد

۴-۳- ارتعاش

روش‌های تشخیصی که بر اساس ارتعاش کار می‌کنند، بر رصد ارتعاشات غیرمعمول ناشی از نوسانات ناهنجار و تغییر شکل‌ها تمرکز دارند و به سیگنال‌های ارتعاشی که نشان‌دهنده خصوصیات دینامیکی توربین‌های بادی (WTBs) هستند، مانند پاسخ‌های فرکانسی و پارامترهای مودال ساختار پره، علاقه‌مندند. این سیگنال‌ها برای شناسایی آسیب‌هایی که باعث تغییر در این خصوصیات می‌شوند مورد استفاده قرار می‌گیرند. تکنیک مبتنی بر ارتعاش که شامل ویژگی‌های مکانیکی ساختار مانند فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودال و میرایی است، به دلیل پیچیدگی و زمان‌بر بودن، برای تشخیص آنلاین مناسب نیست. با این حال، این تکنیک با استفاده از سیگنال‌های پاسخ ساختاری از اندازه‌گیری‌های آنلاین می‌تواند تشخیص آسیب مداوم و آنلاین را با استفاده

⁴ Ulriksen

⁵ Oliveira

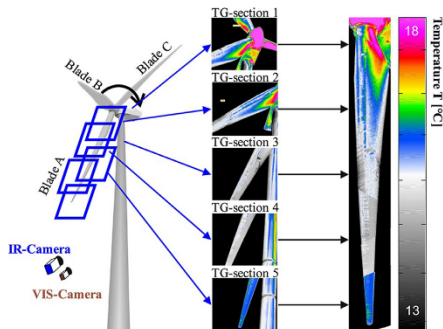
⁶ Colone

¹ Dervilis

² Skrimpas

³ nacelle

سطح پره‌های توربین استفاده می‌شود. با این حال، این روش برای تشخیص خطاها در مراحل اولیه به دلیل رشد کند دما مناسب نیست [۳۹]. طرحی از تکنیک دمانگاری با استفاده از دوربین مبتنی بر مادون قرمز به همراه نتایج ترموگرام در شکل ۸ ارائه شده است. نتیجه شامل پنج ترموگرام جزئی دوخته شده است و تفاوت‌های دما نشان‌دهنده نقص‌های احتمالی در زیرسطح WTBها می‌باشد تفاوت‌های دمایی نزدیک به محور، آسیب‌های احتمالی زیرسطحی WTB را نشان می‌دهند [۴۰].



شکل ۸) شماتیک روش دمانگاری و نتایج ترموگرام [۴۰].

هوانگ^۴ و همکاران یک تکنیک دمانگاری لیزری خطی مداوم [۴۱] و سیستمی مشابه را برای نظارت بر WTBها بدون وارد آوردن خسارت معرفی کردند که این سیستم‌ها حتی در حالت چرخش پره‌ها کار می‌کنند و امواج حرارتی تولید شده را با دوربین‌های مادون قرمز ثبت می‌کنند. ساناتی و همکارانشان [۴۲] به مطالعه دو شیوه متفاوت دمانگاری پرداختند: یکی دمانگاری غیرفعال و دیگری دمانگاری فعال پالسی، به علاوه روش دمانگاری که در آن گرما و سرما به صورت مرحله‌ای اعمال می‌شود. این تکنیک‌ها توانایی کنترل و شناسایی نقایص پره‌های توربین بادی (WTB) را دارند، که در این فرآیند، پردازش تصویر نقش کلیدی در شناسایی دقیق عیوب داخلی ایفا می‌کند. هرچند که مشخص کردن تأثیر دقیق آسیب‌های وارده به پره‌ها بر دما و نادیده گرفتن عوامل مزاحم کاری دشوار است، اما اهمیت بالایی دارد. جدول ۶ به بررسی مزایا و معایب این فناوری تشخیصی مبتنی بر دمانگاری می‌پردازد.

بهبود بخشند. رادار زمینی (GBR¹) به عنوان یک حسگر غیرتماسی مبتنی بر ارتعاش برای نظارت بر سلامت ساختاری (SHM) توربین‌های بادی در میدان به کار گرفته می‌شود که برای تشخیص ارتعاشات از دور شیء مورد آزمایش مناسب است. سامرز^۲ [۳۶] و تالبوت^۳ [۳۷] یک روش اندازه‌گیری غیرتماسی را با استفاده از تکنولوژی رادار لیزری برای بازرسی توربین‌های بادی فراساحلی در مقیاس بزرگ توسعه دادند و پیشنهادی برای بازرسی دیگر سازه‌های بزرگ و انعطاف‌پذیر ارائه دادند. مزایا و معایب تکنولوژی تشخیصی مبتنی بر ارتعاش در جدول ۵ خلاصه شده‌اند. شرایط محیطی و عملیاتی مانند سرعت باد، سرعت چرخش توربین‌های بادی، دما و شرایط بارگذاری محیطی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات دینامیکی پره‌ها مانند فرکانس طبیعی، شکل مود و میرایی داشته باشند. چالش و کانون تحقیقات این تکنیک تفکیک ارتعاشات ناشی از آسیب‌ها از ارتعاشات ناشی از شرایط محیطی و عملیاتی است.

جدول ۵) مزایا و معایب فناوری تشخیصی مبتنی بر ارتعاش

[۳۸]

شماره	مزایا	معایب
۱	غیر مخرب و حساسیت بال	عدم توانایی نظارت بر آسیب های اولیه
۲	آماده برای اجرا	نمی توان آسیب را به طور مستقیم مشاهده کرد
۳	در دسترس به موقعیت و شدت آسیب	تحت تأثیر محیط زیست و ممکن است در تشخیص آسیب اشتباه کند

۳-۵- دمانگاری

روش‌های تشخیصی که بر پایه دمانگاری عمل می‌کنند، به دنبال شناسایی تغییرات در ویژگی‌های ترمودینامیکی پره‌ها هستند که این امکان را می‌دهند تا سطوح وسیعی از WTBها را اسکن کنند. آسیب‌های مادی پره‌ها می‌توانند به صورت غیرمخرب از طریق گرادیان‌های دمایی اندازه‌گیری شوند و بخش‌هایی که دارای آسیب هستند دمای بیشتری نسبت به بخش‌های سالم دارند. معمولاً از حسگرها یا دوربین‌های مبتنی بر مادون قرمز برای نمایش تغییرات دمای

³ Talbot

⁴ Hwang

¹ Ground-based radar

² Summers

جدول ۶) مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر دمانگاری [۴۳]

شماره	مزایا	معایب
۱	قابل استفاده برای اندازه‌گیری کامل	محدود به نظارت آنلاین
۲	مناسب برای تشخیص آسیب‌های ناشی از خستگی و حساسیت به لایه‌لایه شدن	تحت تاثیر دما یا رطوبت هوا
۳	قابل تفسیر به صورت بصری	غیر قابل استفاده برای تشخیص اولیه خرابی
۴	فاصله بازرسی کوتاه	نیازمند پردازش تصویر حرارتی

۳-۶- بینایی ماشین

روش‌های تشخیصی که بر پایه بینایی ماشین هستند، از سری تصاویر دو بعدی و سه بعدی از زوایای و مکان‌های مختلف بهره می‌برند تا اطلاعات مورد نیاز در مورد شیء مورد نظر را جمع‌آوری کنند. این اصول به نوعی شبیه به دید سه‌بعدی چشم انسان است. با پیشرفت‌های اخیر در علم کامپیوتر و تجهیزات اپتیکی، استفاده از روش‌های مبتنی بر دید ماشین در تشخیص خرابی‌ها، شناسایی دینامیکی و دیگر جنبه‌های نظارت بر سلامت سازه‌ها (SHM) افزایش یافته است [۴۴]. این روش‌ها می‌توانند دقت و کارایی تشخیص را بهبود ببخشند که این امر به الگوریتم‌های پردازش تصویر بستگی دارد. علاوه بر این، روش‌های مبتنی بر دید ماشین کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار دارند در مقایسه با سایر روش‌های تشخیص. این روش همچنین به عنوان یک راهکار کارآمد و صرفه‌جویانه برای نظارت بر پره‌های توربین‌های بادی در حین کارکرد آن‌ها شناخته شده است و تنها روش موجود برای تشخیص فرو رفتگی‌های سطح تحت فشار کم است. تکنولوژی تشخیص مبتنی بر بینایی ماشین قادر است خرابی‌هایی که روی سطح قابل مشاهده‌اند، مانند ترک‌ها و خراش‌ها، را شناسایی کند. نمونه اولیه این تکنولوژی تشخیص در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است. این تصویر، روش تشخیص بینایی دوچشمی را نشان می‌دهد که با استفاده از اصول پارالاکس، اطلاعات پره را از طریق دریافت تصاویر از دو

مکان متفاوت جمع‌آوری می‌کند. سیستم تشخیص شامل مراحل جمع‌آوری تصویر، پردازش تصویر و شناسایی خرابی‌ها می‌باشد [۴۴]. این تکنولوژی نیازمند استانداردهای بالایی در زمینه دستگاه‌های تصویربرداری و قابلیت‌های پردازش داده است، به‌ویژه برای نظارت آنلاین. این تکنولوژی همچنین می‌تواند خطرات ناشی از کارهای پرخطر را برای کارگران در مزارع بادی کاهش دهد. استوک‌لند^۱ و همکاران [۴۵] روشی بر پایه بینایی ماشین با استفاده از پهپاد برای شناسایی و ردیابی توربین‌های بادی و پره‌های آن‌ها ارائه دادند، که در آن از تبدیل خط هوف^۲ برای شناسایی و فیلتر کالمن برای ردیابی استفاده شده است. وانگ و همکاران [۴۶] چارچوبی برای تشخیص خودکار ترک‌ها در WTBها بر اساس تصاویر گرفته شده توسط پهپاد با استفاده از ویژگی‌های مشابه Haar پیشنهاد کردند. بابو^۳ و همکاران [۴۷] روشی برای شناسایی ترک‌ها بر اساس ویژگی‌های متنی ارائه دادند که امکان بازرسی خودکار ترک‌های اولیه در WTBها را فراهم می‌کند. مورنو^۴ و همکاران [۴۸] روشی بر پایه بینایی ماشین با یادگیری عمیق را معرفی کردند که در آن از دوربین‌های نصب شده بر روی سیستم‌های رباتیک برای نظارت خودکار بر هر بخش از سطح پره استفاده می‌شود و قادر به تشخیص خرابی‌هایی مانند تأثیرات اشعه خورشید، سایش و شکستگی‌ها هستند. روش‌های مبتنی بر دید ماشین به طور معمول با دیگر تکنیک‌های نظارتی ترکیب می‌شوند. داود^۵ و همکاران [۴۹] از روش‌های بصری غیرمخرب به همراه حسگرهای پیزوالکتریک برای ارزیابی خسارت‌های وارد شده به پره‌ها بر اثر صاعقه استفاده کردند. تحقیقات در زمینه استفاده از دید ماشین برای نظارت بر سلامت سازه‌های WTBها هنوز در مراحل ابتدایی خود به سر می‌برد، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده. با این حال، با پیشرفت‌های اخیر در زمینه دید ماشین، این فناوری به عنوان یک تکنولوژی امیدبخش برای تشخیص سطحی تجهیزات یا ساختمان‌های بلند یا بزرگ در آینده مطرح است و می‌تواند به کاهش چشمگیر هزینه‌های نصب، اندازه‌گیری‌های کامل میدانی و فراهم کردن اطلاعات بصری و بدون نیاز به دما برای بازرسی سازه‌ها کمک کند. مشخص شده است که دقت تشخیص می‌تواند با استفاده

^۱ Moreno^۵ Daud^۱ Stokkeland^۲ Hough^۳ Babu

۴-۲- آزمون رادیوگرافی (Radiographic Testing)

در این روش از پرتوهای ایکس یا گاما برای شناسایی عیوب داخلی استفاده می‌شود. تصاویر رادیوگرافی می‌توانند عیوبی مانند ترک‌ها و حفره‌ها را در ساختارهای پیچیده شناسایی کنند. این روش به دقت بالایی نیاز دارد و معمولاً در شرایط خاصی انجام می‌شود [۵۲].

۴-۳- آزمون الکترومغناطیسی (Electromagnetic Testing)

این روش برای شناسایی عیوب سطحی و زیرسطحی در مواد رسانا به کار می‌رود. با ایجاد یک میدان الکترومغناطیسی و تحلیل تغییرات آن، می‌توان عیوب را شناسایی کرد [۵۲].

۴-۴- شیراگرافی (Shearography Testing)

شیراگرافی یک روش غیرمخرب است که با استفاده از نور لیزر، ناهنجاری‌ها و عیوب سطحی را شناسایی می‌کند. این روش به ویژه در شناسایی عیوب در سطوح بزرگ و پیچیده مؤثر است [۵۲].

۴-۵- آزمون‌های نوری (Optical Testing)

این روش شامل استفاده از تکنیک‌های نوری برای بررسی عیوب سطحی و ناهنجاری‌ها در مواد است. با استفاده از دوربین‌های با وضوح بالا و نورپردازی مناسب، می‌توان عیوبی مانند ترک‌ها و خوردگی‌ها را شناسایی کرد [۵۲].

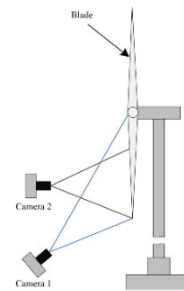
۴-۶- آزمون‌های الکتریکی (Electrical Testing)

این تکنیک شامل استفاده از روش‌های الکتریکی برای شناسایی عیوب در مواد رسانا می‌باشد. با اندازه‌گیری مقاومت و دیگر ویژگی‌های الکتریکی، می‌توان به وجود عیوب داخلی پی برد [۵۲].

۴-۷- آزمون رادیوگرافی دیجیتال (Digital Radiographic Testing)

نسخه پیشرفته‌تری از آزمون رادیوگرافی است که از تکنولوژی دیجیتال برای تولید تصاویر با کیفیت بالاتر استفاده می‌کند. این روش به شناسایی عیوب داخلی و سطحی در ساختارهای پیچیده کمک می‌کند [۵۲].

از سخت‌افزارهای تخصصی یا روش‌های پردازش داده به راحتی افزایش یابد و حل مشکل به دست آوردن تصاویر با کیفیت بالا و چند دید از WTBها و استخراج اطلاعات خسارت از پس‌زمینه‌های پیچیده از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، تحقیقات آینده باید بر توسعه فناوری‌های پردازش تصویر و الگوریتم‌های مرتبط، مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان، یادگیری ماشین برای شناسایی خسارت‌ها و موارد دیگر تمرکز کنند. مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر دید ماشین در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۹) نمونه اولیه فناوری تشخیص مبتنی بر بینایی ماشین [۵۰]

جدول ۷) مزایا و معایب فناوری تشخیص مبتنی بر بینایی ماشین [۵۱]

شماره	مزایا	معایب
۱	هزینه کم	نیازمند محاسبات زیاد
۲	مناسب برای آسیب‌های سطحی	قابل استفاده به صورت مستقل نیست
۳	اجتناب از خطرات ایمنی کار انسانی	دقت بستگی به پردازش تصویر دارد
۴	قابل استفاده برای جابجایی آسیب و نظارت آنلاین	قابل استفاده برای توضیح مکانیزم فیزیکی آسیب‌ها نیست

۴- آزمون‌های غیرمخرب دیگر

۴-۱- آزمون بصری (Visual Testing)

آزمون بصری یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین روش‌های NDT است که به شناسایی عیوب سطحی مانند ترک‌ها، خوردگی و آسیب‌های ظاهری کمک می‌کند. این روش به تجهیزات خاصی نیاز ندارد و معمولاً توسط اپراتورهای با تجربه انجام می‌شود [۵۲].

۴-۸- آزمون میکروسکوپی (Microscopic Testing)

این روش شامل استفاده از میکروسکوپ‌ها برای بررسی دقیق‌تر ساختار مواد و شناسایی عیوب میکروسکوپی است. این تکنیک می‌تواند به شناسایی ترک‌های ریز و دیگر ناهنجاری‌ها کمک کند [۵۲]. در جدول ۸ ویژگی هر روش، به همراه مزایا و معایب آن آمده است.

جدول ۸) خلاصه‌ای از روش‌های غیر مخرب برای بررسی پره توربین باد به همراه مزایا و معایب آن‌ها [۵۲]

روش	توضیحات روش	مزایا	معایب
آزمون بصری	شناسایی عیوب سطحی مانند ترک‌ها و خوردگی با استفاده از بازرسی چشمی	ساده و سریع-هزینه کم- نیاز به تجهیزات حداقلی	وابسته به تجربه بازرسان- محدود به عیوب سطحی
آزمون فراصوت	شناسایی عیوب داخلی و سطحی با استفاده از امواج صوتی با فرکانس بالا	دقت بالا در شناسایی عیوب داخلی- قابلیت تشخیص عمق عیوب	نیاز به تجهیزات تخصصی- ممکن است تحت تأثیر شرایط سطحی قرار گیرد
دمانگاری	شناسایی عیوب با استفاده از تصاویر حرارتی و تغییرات دمایی سطح	شناسایی سریع ناهنجاری‌ها- بدون تماس با سطح	حساس به شرایط محیطی- ممکن است نیاز به کالیبراسیون داشته باشد
آزمون رادیوگرافی	شناسایی عیوب داخلی با استفاده از پرتوهای ایکس یا گاما	شناسایی عیوب داخلی و سطحی- دقت بالا	- نیاز به تجهیزات سنگین و تخصصی- خطرات ناشی از تابش

آزمون الکترومغناطیسی	شناسایی عیوب سطحی و زیر سطحی در مواد رسانا با ایجاد میدان الکترومغناطیسی	نیاز به تحلیل پیچیده داده‌ها- ممکن است تحت تأثیر نویزهای محیطی قرار گیرد
آزمون نشر آوایی	شناسایی عیوب از طریق تحلیل صداهای تولید شده توسط مواد در حین بارگذاری	نیاز به تجهیزات خاص- محدود به عیوب سطحی
شیراگرافی	شناسایی عیوب سطحی با استفاده از نور لیزر	دقت بالا در شناسایی عیوب سطحی- سریع و بدون تماس
آزمون‌های نوری	شناسایی عیوب سطحی با استفاده از تکنیک‌های نوری و دوربین‌های با وضوح بالا	دقت بالا در شناسایی عیوب سطحی- قابلیت بررسی دقیق
الکتريکی	شناسایی عیوب با اندازه‌گیری ویژگی‌های الکتریکی مواد	محدود به مواد رسانا- نیاز به تجهیزات خاص
آزمون‌های رادیوگرافی دیجیتال	شناسایی عیوب با استفاده از تکنولوژی دیجیتال و تصاویر با کیفیت بالاتر	دقت بالا و کیفیت تصاویر- کاهش زمان پردازش

(۱) با پیشرفت‌هایی که در زمینه دید ماشین و فرآیندهای پردازش تصویر صورت گرفته، تکنولوژی تشخیص مبتنی بر دید ماشین به عنوان یک روش بسیار امیدبخش و کلیدی برای شناسایی آسیب‌های سطحی و اندازه‌گیری تغییرات شکل در توربین‌های بادی مطرح شده است. این به دلیل هزینه‌های کم، سهولت در اجرا و نیاز نداشتن به اطلاعات قبلی در مورد مکان‌های آسیب است. محققان این فناوری را به طور وسیعی برای شناسایی آسیب‌های سطحی توربین‌های بادی و دیگر اجزای بزرگ به کار برده‌اند. چون دقت تشخیص می‌تواند به آسانی با استفاده از تجهیزات تخصصی جمع‌آوری تصاویر و روش‌های پیشرفته پردازش تصویر افزایش یابد، تحقیقات آتی باید بر روی پردازش تصاویر و الگوریتم‌های مرتبط، مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان، و یادگیری ماشین برای تشخیص آسیب‌ها متمرکز شوند. همچنین، سیستم تشخیص مبتنی بر پهپاد که از روش‌های مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان استفاده می‌کند، به عنوان یک راهکار بسیار امیدوارکننده برای اندازه‌گیری‌های پویا و بازرسی‌های آنلاین پره‌ها شناخته شده است.

(۳) استفاده از حداقل دو روش تشخیصی مانند نشر آوایی، روش فراصوتی، دید ماشین و سایر روش‌ها توصیه می‌شود تا بتوانیم به طور کامل پره‌ها را مورد بررسی قرار دهیم و انواع مختلف آسیب‌ها را در مناطق متفاوت شناسایی کنیم. اما نکته مهم این است که هدف اصلی این روش‌ها تنها شناسایی آسیب نیست، بلکه پیش‌بینی و تشخیص خرابی‌ها در توربین‌های بادی برای مدیریت سلامت و نگهداری و همچنین برای فهم بهتر مکانیزم‌های شکست آن‌هاست. علاوه بر این، بررسی مکانیزم آسیب از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که هنوز ارتباط بین آسیب و عمر مفید باقی‌مانده پره‌ها مشخص نیست. بنابراین، باید از تکنیک‌های تشخیص آسیب برای روشن‌سازی مکانیزم آسیب و کاهش طول عمر پره‌های توربین ناشی از آسیب‌ها استفاده شود.

(۲) آسیب‌های وارد بر یک ساختار می‌توانند باعث ایجاد خصوصیات غیرخطی در ماده شوند، و مشکلات غیرخطی مانند تمرکز تنش، خمش محلی و دیگر موارد می‌توانند منجر به شکست پره شوند. زمانی که پره دچار آسیب می‌شود، پاسخ آن دارای ویژگی‌های غیرخطی خواهد بود که می‌تواند وجود آسیب را تشخیص دهد. بنابراین، می‌توان از روش‌های

نیاز به تحلیل پیچیده داده‌ها - ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی قرار گیرد	شناسایی ناهنجاری‌ها در عملکرد مکانیکی از نظارت در زمان واقعی	شناسایی ناهنجاری‌ها در عملکرد مکانیکی از طریق تحلیل الگوهای نوسانی	آزمون‌های نوسان‌سنجی
زمان‌بر و نیاز به تجهیزات تخصصی - محدود به سطح نمونه	شناسایی عیوب میکروسکوپی - دقت بالا	شناسایی عیوب میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ‌ها	میکروسکوپی آزمون‌های

۵- چشم انداز تکنیک‌های تشخیص آسیب WTB

برای برآوردن الزامات صنعتی در بازرسی و نگهداری WTB، ما معتقدیم که روندهای تحقیقاتی آینده ممکن است جنبه‌های زیر را شامل شود:

(۱) با توسعه رویکردهای بینایی ماشین و پردازش تصویر، فناوری تشخیص مبتنی بر بینایی ماشین به یک تکنیک امیدوارکننده و اصلی برای تشخیص آسیب سطحی و اندازه‌گیری تغییر شکل WTBها بدلیل کم‌هزینه بودن، کارکرد آسان و عدم نیاز به دانش قبلی در مورد موقعیت‌های آسیب تبدیل می‌شود. محققان به طور گسترده‌ای از این فناوری برای دستیابی به تشخیص آسیب سطحی WTBها یا سایر اجزای بزرگ استفاده کرده‌اند. از آنجایی که دقت تشخیص را می‌توان به آسانی با استفاده از دستگاه‌های تخصصی جمع‌آوری تصویر و رویکردهای پردازش تصویر بهبود بخشید، کارهای آینده باید بر روی پردازش تصویر و الگوریتم‌های مرتبط، محلی سازی و نقشه برداری همزمان، یادگیری ماشین برای تشخیص آسیب و غیره تمرکز کنند. سیستم تشخیص مبتنی بر پهپاد با استفاده از روش‌های محلی‌سازی و نقشه‌برداری همزمان به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده برای اندازه‌گیری پویا و بازرسی آنلاین پره‌ها در نظر گرفته می‌شود.

برای رفع نیازهای صنعتی در بررسی و مراقبت از توربین‌های بادی، ما بر این باوریم که مسیر تحقیقات آینده ممکن است شامل موارد زیر باشد:

پرداخته شود.

(۴) تکنیک‌های تشخیص آسیب به نصب کابل‌ها و منابع تغذیه برای انجام کار خود نیاز دارند. با توجه به اینکه توربین‌های بادی در حال چرخش هستند، انتقال بی‌سیم سیگنال‌ها و تشخیص بی‌سیم برای تشخیص آسیب به صورت آنلاین ضروری است. هرچند برخی از حسگرها/دستگاه‌های تشخیص که روی پره‌ها نصب می‌شوند می‌توانند انرژی خود را از توربین بادی دریافت کنند، اما تکنیک‌هایی که آسیب‌ها را از فواصل دور تشخیص می‌دهند به منابع تغذیه خارجی نیاز دارند که ممکن است نامناسب یا پرهزینه باشد. علاوه بر این، زمانی که توربین کار نمی‌کند، تشخیص آسیب‌های پره توسط تکنیک‌هایی که با انرژی توربین بادی کار می‌کنند، غیرممکن است. توسعه دستگاه‌های تشخیص آسیب هوشمند و خودکفا می‌تواند برای شناسایی آسیب‌های پره‌ها جذاب و بی‌سیم باشد. در دهه گذشته، تکنیک‌های استحصال انرژی که انرژی محیطی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. این تکنیک‌ها پتانسیل بزرگی برای تأمین انرژی شبکه‌های حسگر بی‌سیم و دستگاه‌های کوچک الکترومکانیکی دارند [۵۵]. به عنوان مثال، دستگاه‌های استحصال انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک موجود در مقیاس میکرو می‌توانند انرژی را در سطح میلی‌وات تولید کنند و در مناطق دوردست برای جمع‌آوری انرژی ارتعاشی محیطی و فراهم کردن منبع تغذیه دائمی نصب شوند [۵۶]. استحصال‌کننده‌های انرژی مبتنی بر باد نیز توسعه یافته‌اند تا انرژی را از بادهای با سرعت پایین به طور مؤثر جمع‌آوری کنند. این می‌تواند برای تأمین انرژی دستگاه‌ها/حسگرهای تشخیص آسیب هوشمند اطراف توربین بادی یا حمل شده توسط آن‌ها مناسب باشد و این موضوع به یک محور تحقیقاتی جدید در زمینه تشخیص آسیب‌های توربین‌های بادی تبدیل خواهد شد. برای استحصال انرژی در مقیاس کوچک، استحصال‌کننده‌های انرژی الکترومغناطیسی قابل حمل با توان خروجی در سطح وات نیز طراحی شده‌اند تا دستگاه‌های بی‌سیم را تغذیه کنند [۵۷]. علاوه بر این، مولدهای انرژی خورشیدی می‌توانند به عنوان مکملی برای استحصال‌کننده‌های انرژی ارتعاشی عمل کنند تا منبع تغذیه‌ای مطمئن برای دستگاه‌های تشخیص آسیب هوشمند و خودکفا فراهم کنند. بنابراین، در تحقیقات آینده، طراحی و

تشخیص آسیب مبتنی بر اصول غیرخطی به همراه فناوری‌های ذکر شده برای شناسایی آسیب‌ها استفاده کرد. در مقایسه با مدل‌سازی‌های ریاضی، روش‌های مبتنی بر مدل و سایر تکنیک‌ها، روش‌های تشخیص آسیب که بر اساس اصول غیرخطی عمل می‌کنند، به دلیل استفاده کامل از ویژگی‌های غیرخطی، دارای دقت و مقاومت بالایی هستند. این روش‌ها برای استخراج ویژگی‌های خطای غیرخطی در شناسایی الگوها به کار گرفته شده‌اند تا مدیریت سلامت سازه‌ای (SHM) در توربین‌های بادی را اجرا کنند، از جمله خود رگرسیون غیرخطی با عوامل خارجی (NARX)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی غیرخطی سلسله‌مراتبی (NLPCA) و سایر روش‌ها [۵۳]. پاسخ‌های هارمونیک، پاسخ‌های زیرهارمونیک، رزونانس غیرخطی و موارد مشابه، ویژگی‌های غیرخطی هستند که با بروز آسیب‌ها ارتباط دارند. امروزه، تعداد زیادی از روش‌ها مانند تکنیک‌های فراصوت غیرخطی، تکنیک‌های صوتی غیرخطی، تکنیک‌های مبتنی بر ارتعاشات غیرخطی، تکنیک‌های پردازش تصویر و غیره، از خصوصیات غیرخطی به عنوان شاخص‌های خرابی بهره می‌برند. تکنیک‌های فراصوت غیرخطی نسبت به روش‌های خطی به آسیب‌های ریز حساس‌تر هستند و می‌توان با استفاده از ویژگی‌های غیرخطی امواج لمب، مکان‌یابی آسیب‌ها و شناسایی ترک‌های ریز خستگی را انجام داد [۵۴]. چون سطوح آسیب‌دیده ممکن است خصوصیات صوتی غیرخطی بالایی داشته باشند، می‌توان از تکنیک‌های صوتی غیرخطی برای تشخیص واضح آسیب‌های پره استفاده کرد، اما پژوهشگران تأکید کرده‌اند که باید در تحقیقات آینده به تفکیک خصوصیات غیرخطی ناشی از ترک‌ها از آن‌هایی که به دلیل منابع نامعلوم هستند، پرداخته شود. تکنیک‌های مبتنی بر ارتعاشات غیرخطی می‌توانند با اندازه‌گیری تغییرات در پاسخ‌های غیرخطی ساختار، نشانه‌های پیش‌روی آسیب‌های خستگی را شناسایی و برآورد کنند. تکنیک تشخیص مبتنی بر مدولاسیون ویبره-آکوستیک به اثبات رسیده که می‌تواند به طور مؤثری ترک‌ها را در مواد کامپوزیتی با اندازه‌گیری افزایش در خصوصیات غیرخطی تشخیص دهد و کمتر تحت تأثیر شرایط محیطی و عملیاتی متغیر قرار می‌گیرد، که این مزیتی برای جبران نقص تکنیک‌های مبتنی بر ارتعاش سنتی است. همچنین، باید در آینده به روابط بین شاخص‌های خرابی و مکانیزم‌های شکست

- [1] Fang, K., Zhou, Y., Wang, S., Ye, R., & Guo, S. (2018). Assessing national renewable energy competitiveness of the G20: A revised Porter's Diamond Model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 719-731.
- [2] Chou, J.-S., Chiu, C.-K., Huang, I.-K., & Chi, K.-N. (2013). Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads. *Engineering Failure Analysis*, 27, 99-118.
- [3] Liu, W., Tang, B., Han, J., Lu, X., Hu, N., & He, Z. (2015). The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 466-472.
- [4] Yang, R., He, Y., & Zhang, H. (2016). Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1225-1250.
- [5] Lin, Y., Tu, L., Liu, H., & Li, W. (2016). Fault analysis of wind turbines in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 482-490.
- [6] Meng, H., Lien, F.-S., & Li, L. (2018). Elastic actuator line modelling for wake-induced fatigue analysis of horizontal axis wind turbine blade. *Renewable Energy*, 116, 423-437.
- [7] Ciang, C. C., Lee, J.-R., & Bang, H.-J. (2008). Structural health monitoring for a wind turbine system: A review of damage detection methods. *Measurement Science and Technology*, 19(12), 122001.
- [8] Ackermann, T., & Söder, L. (2000). Wind energy technology and current status: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(4), 315-374.
- [9] Garolera, A. C., Madsen, S. F., Nissim, M., Myers, J. D., & Holboell, J. (2014). Lightning damage to wind turbine blades from wind farms in the US. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(3), 1043-1049.

ادغام دستگاه‌های استحصال انرژی با سیستم‌های تشخیص آسیب برای پره‌های توربین‌های بادی مسائلی جذاب و پرچالش به شمار می‌روند و می‌توانند به عنوان جهت‌گیری‌های آتی در نظر گرفته شوند.

۵. نتیجه‌گیری

تشخیص آسیب برای بازرسی پره در حین سرویس بسیار مهم است، زیرا اندازه و پیچیدگی ساختاری پره‌های توربین در دهه گذشته به طور قابل توجهی افزایش یافته و تعمیر و نگهداری منجر به هزینه‌های بالایی شده است. این مقاله مروری بر تکنیک‌های تشخیص آسیب بر اساس اندازه‌گیری کرنش، انتشار آکوستیک، روش فراصوتی، ارتعاش، دمانگاری و بینایی ماشین برای بازرسی پره ارائه کرده است. به طور خاص، اصول تشخیص، روش‌های توسعه، مزایا و معایب هر تکنیک با اطلاعات جامع و به روز و شاخص‌های خطای آنها بررسی شد. علاوه بر این، تکنیک‌های امیدوارکننده در تشخیص آسیب WTBها اشاره شده و روندهای احتمالی آینده از طریق یک تحلیل مقایسه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرند. روند تشخیص آسیب در توربین‌های بادی به سمت روش‌هایی است که قابلیت‌های کامل، دوربرد، بدون تماس، غیرمخرب، بی‌سیم و نظارت آنلاین را دارند. تشخیص به موقع آسیب‌های پره و ارزیابی مستمر سلامت ساختاری توربین‌های بادی از اهمیت روزافزونی برخوردار است. روش‌های مبتنی بر دید ماشین به عنوان یک روش پتانسیل و مؤثر برای بازرسی مستمر سطح توربین‌های بادی شناخته شده‌اند و تحقیقات گسترده در زمینه پردازش تصویر و الگوریتم‌های مرتبط به شدت توصیه می‌شود. همچنین، این مقاله ایده‌های نوین برای طراحی و ادغام دستگاه‌های استحصال انرژی و روش‌های تشخیص آسیب توربین‌های بادی را پیشنهاد می‌کند که در آن دستگاه‌ها خودکفا و بی‌سیم هستند. اگرچه این مرور جدید در مورد تکنیک‌های تشخیص آسیب توربین‌های بادی نمی‌تواند تمام موضوعات مرتبط را به طور کامل پوشش دهد، اما امیدواریم که بتواند اطلاعات باارزشی را برای فعالان این حوزه فراهم آورد.

۶- منابع

- in wind turbine blades based on blind deconvolution separation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(6), 959-970.
- [19] Li, X., Yang, Z., & Chen, X. (2014). Quantitative damage detection and sparse sensor array optimization of carbon fiber reinforced resin composite laminates for wind turbine blade structural health monitoring. *Sensors*, 14(4), 7312-7331.
- [20] Jørgensen, E. R., Borum, K. K., McGugan, M., Thomsen, C., Debel, C., & Sørensen, B. F. (2004). Full scale testing of wind turbine blade to failure-flapwise loading.
- [21] Tchakoua, P., Wamkeue, R., Tameghe, T. A., & Ekemb, G. (2013). A review of concepts and methods for wind turbines condition monitoring. In 2013 World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT) (pp. 1-9). IEEE.
- [22] Katnam, K., Comer, A., Roy, D., Da Silva, L., & Young, T. (2015). Composite repair in wind turbine blades: An overview. *The Journal of Adhesion*, 91(1-2), 113-139.
- [23] Hernandez Crespo, B. (2016). Damage sensing in blades. *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, 25-52.
- [24] Park, B., An, Y.-K., & Sohn, H. (2014). Visualization of hidden delamination and debonding in composites through noncontact laser ultrasonic scanning. *Composites Science and Technology*, 100, 10-18.
- [27] Ye, G., Neal, B., Boot, A., Kappatos, V., Selcuk, C., & Gan, T.-H. (2014). Development of an ultrasonic NDT system for automated in-situ inspection of wind turbine blades. In EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring.
- [26] Habibi, H., Cheng, L., Zheng, H., Kappatos, V., Selcuk, C., & Gan, T.-H. (2015). A dual de-
- [10] Sørensen, B. F., Joergensen, E., Debel, C. P., Jensen, H. M., Jacobsen, T. K., & Halling, K. (2004). Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1). Summary report.
- [11] Schubel, P., Crossley, R., Boateng, E., & Hutchinson, J. (2013). Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades. *Renewable Energy*, 51, 113-123.
- [12] Ye, X., Su, Y., & Han, J. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [13] Hameed, Z., Hong, Y., Cho, Y., Ahn, S., & Song, C. (2009). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 1-39.
- [14] Ramakrishnan, M., Rajan, G., Semenova, Y., & Farrell, G. (2016). Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors*, 16(1), 99.
- [15] Nair, A., & Cai, C. (2010). Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies. *Engineering Structures*, 32(6), 1704-1714.
- [16] Qiao, W., & Lu, D. (2015). A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis—Part II: Signals and signal processing methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6546-6557.
- [17] Blanch, M., & Dutton, A. (2003). Acoustic emission monitoring of field tests of an operating wind turbine. *Key Engineering Materials*, 245, 475-482.
- [18] Bo, Z., Yanan, Z., & Changzheng, C. (2017). Acoustic emission detection of fatigue cracks

- [34] Oliveira, G., Magalhães, F., Cunha, Á., & Caetano, E. (2018). Vibration-based damage detection in a wind turbine using 1 year of data. *Structural Control and Health Monitoring**, 25(11), e2238.
- [35] Colone, L., Hovgaard, M., Glavind, L., & Brincker, R. (2018). Mass detection, localization and estimation for wind turbine blades based on statistical pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing**, 107, 357-374.
- [36] Jin, X., Jiang, C., Li, Y., Yang, S., & Qiao, G. (2018). Health monitoring of composite materials: A review of current and future trends. *Composite Structures*, 196, 166-185.
- [37] Amani, M., Nejad, M. F., & Sadoughi, A. (2015). An experimental study on the effect of mechanical properties of wind turbine blades on the fatigue life. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 146, 303-311.
- [38] Wang, Y., Wang, H., Huang, Y., & Wang, X. (2019). Condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine blades based on vibration and temperature signals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 273-285.
- [39] Cheng, L., & Chen, Y. (2018). Review on vibration-based structural health monitoring of wind turbine blades. *Engineering Structures**, 163, 372-387.
- [40] Qiao, Y., Sun, L., & Wang, C. (2019). A review of vibration-based damage detection in wind turbine blades. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(4), e2271.
- [41] Sun, S., & Chen, C. (2018). Time-frequency analysis of wind turbine blade vibrations using the wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99, 177-191.
- [42] Liu, H., Chen, Q., Zhang, J., & Sun, L. (2017). Damage detection in wind turbine blades icing system for wind turbine blades combining high-power ultrasonic guided waves and low-frequency forced vibrations. *Renewable Energy*, 83, 859-870.
- [27] Jiménez, A. A., Muñoz, C. Q. G., & Márquez, F. P. G. (2019). Dirt and mud detection and diagnosis on a wind turbine blade employing guided waves and supervised learning classifiers. *Reliability Engineering & System Safety*, 184, 2-12.
- [28] Sohn, H., Dutta, D., Yang, J., DeSimio, M., Olson, S., & Swenson, E. (2011). Automated detection of delamination and disbond from wavefield images obtained using a scanning laser vibrometer. *Smart Materials and Structures*, 20(4), 045017.
- [29] Yan, Y., Cheng, L., Wu, Z., & Yam, L. (2007). Development in vibration-based structural damage detection technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(5), 2198-2211.
- [30] Amezcua-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2016). Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23, 1-15.
- [31] Dervilis, N., et al. (2014). On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition. *Journal of Sound and Vibration*, 333(6), 1833-1850.
- [32] Skrimpas, G. A., Kleani, K., Mijatovic, N., Sweeney, C. W., Jensen, B. B., & Holboell, J. (2016). Detection of icing on wind turbine blades by means of vibration and power curve analysis. *Wind Energy*, 19(10), 1819-1832.
- [33] Ulriksen, M. D., Tcherniak, D., Kirkegaard, P. H., & Damkilde, L. (2016). Operational modal analysis and wavelet transformation for damage identification in wind turbine blades. *Structural Health Monitoring*, 15(4), 381-388.

- [52] Zhang, Y., Xiong, J., Wang, X., & Liu, J. (2016). Recent advances in condition monitoring and fault diagnosis of wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 267-280.
- [53] Chen, C., Chen, L., & Chang, Y. (2017). A review of wind turbine blade condition monitoring methods based on vibration signals. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(3), e1944.
- [54] Stojanovic, J., & Ostoja-Starzewski, M. (2018). Health monitoring of wind turbine blades: Review and future directions. *Wind Energy*, 21(9), 1039-1052.
- [55] Zhao, X., Wang, F., & Li, J. (2017). Review on the applications of fiber optic sensors for health monitoring of wind turbine blades. *Sensors*, 17(12), 2741.
- [56] Hu, G., & Wang, H. (2018). A review on condition monitoring of wind turbine blades using infrared thermography. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2066-2078.
- [57] Liao, Y., Wang, S., & Yang, Y. (2017). A review of recent developments in condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine blades. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 86, 547-567.
- using vibration signals based on neural networks. *Energy*, 132, 145-155.
- [43] Hu, X., Li, Q., & Qian, Z. (2016). A comprehensive review of the state of health monitoring methods for wind turbine blades. **Applied Energy**, 179, 1090-1103.
- [44] Huang, J., Yang, Y., & Zhang, Y. (2015). Research on the structural health monitoring of wind turbine blades: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 88-103.
- [45] Costa, J. L., & Pina, A. C. (2018). Non-destructive testing and monitoring techniques for wind turbine blades: A review. *NDT & E International*, 98, 35-47.
- [46] Adhikari, R., & Bhatia, K. (2017). Structural health monitoring of wind turbine blades using acoustic emission and vibration techniques: A review. *Smart Structures and Systems*, 19(2), 219-234.
- [47] Wang, Y., & Wu, D. (2017). A review of structural health monitoring of wind turbine blades using vibration-based methods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 170, 290-306.
- [48] Zhan, C., Liu, J., & Zhang, H. (2019). Review of piezoelectric-based health monitoring of wind turbine blades. *Sensors*, 19(1), 135.
- [49] Yang, M., & Wang, L. (2019). Vibration-based structural health monitoring of wind turbine blades using a multi-sensor approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 126, 359-372.
- [50] Adeli, H., & Jiang, J. (2016). Smart structures and systems: Technology and applications. *Computational Mechanics*, 58(1), 19-32.
- [51] Montalvo, A., & Gonzalez, R. (2018). Applications of machine learning in wind turbine condition monitoring: A review. *Energy Reports*, 4, 554-560.