Sharif University of Technology

Sharif Mechanical Engineering Journal

https://sjme.journals.sharif.edu

Research Article

Modal-based Structural Health Monitoring of a Composite Wind-Turbine Blade

Seyed Mohammad Hossein Sharifi*, Gholamreza Rashed and Mohammad Foad Salamizadeh

Department of Mechanical Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan Faculty of Petroleum, Abadan.
* Corresponding author:(sharifi@put.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 12 August 2025

Revised: 8 September 2025

Accepted: 4 October 2025

Keywords:

Structural health monitoring,
wind turbine blade,
crack growth,
finite element method,
modal analysis.

Abstract

Health monitoring of rotating machinery, particularly wind turbines, has become increasingly important due to the demand for reliability, efficiency, and reduced maintenance costs in renewable energy systems. Wind turbine blades, being large composite structures subjected to dynamic loading and harsh environmental conditions, are highly vulnerable to damage such as crack initiation and growth. Early detection of such damage is critical to prevent catastrophic failures and costly downtime. This study applies vibration-based modal analysis in combination with fracture mechanics principles to monitor the health of a composite wind turbine blade. A finite element (FE) model was developed in ANSYS to simulate the structural response of the blade under different crack lengths and positions. The natural frequencies and mode shapes were extracted for both healthy and defective blades. Results reveal a clear relationship between crack growth and frequency reduction. Critical crack depths were identified: 250 mm for cracks near the root, 300 mm for cracks in the middle, and 350 mm for cracks near the tip. Furthermore, each mode exhibited different levels of sensitivity to crack location, with bending modes more responsive near the root and torsional modes more affected near the tip. These findings highlight the potential of modal analysis as a practical tool for structural health monitoring (SHM) of wind turbine blades in real-time applications.

Introduction

The rapid expansion of wind energy as a major renewable resource has led to significant growth in the deployment of large-scale wind turbines. Ensuring the structural integrity of their blades is critical because any failure in these components directly impacts energy production, operational costs, and safety. Wind turbine blades, typically made of fiber-reinforced composites, experience continuous dynamic loading from wind forces, gravitational effects, and centrifugal stresses during operation. Over time, these loads can initiate cracks that propagate, leading to stiffness reduction and eventually catastrophic failure.

Traditional non-destructive testing (NDT) methods such as ultrasonic, eddy current, or radiography are not always feasible for in-service blades due to accessibility challenges, cost, and limited reliability under real operating conditions. As an alternative, vibration-based methods, particularly modal analysis, offer a promising solution. Modal parameters such as natural frequencies and mode shapes are highly sensitive to structural changes. Any alteration in stiffness or mass distribution caused by cracks or delamination manifests as detectable shifts in these parameters.

Previous studies have explored the relationship between notches or cracks and modal behavior in gas turbine compressor blades, steam turbine blades, and scaled wind turbine models. However, limited research has addressed the systematic identification of critical crack depths in full-scale wind turbine blades and the comparative influence of crack positions along the blade span. The present study fills this gap by numerically analyzing a 9.65 m composite blade through finite element modeling and modal simulations.

Methodology

The methodology integrates finite element modeling, fracture mechanics, and modal analysis to assess the effect of crack size and location on the dynamic response of a wind turbine blade.

To Cite this article:
Sharifi, S.M.H., Rashed, G. and Salamizadeh, M.F. 2026. Application of modal analysis for health monitoring of wind turbine blade, Sharif Mechanical Engineering Journal, **42**(1), 17-25. https://doi.org/10.24200/j40.2025.67449.1745

E-ISSN: 2676-4733 © 2026 The Author(s). Sharif Mechanical Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

The blade under investigation has a length of 9.65 m and was modeled according to actual design specifications. A carbon/epoxy laminate with a thickness of 7.65 mm was used, providing high strength-to-weight ratio. The layup consisted of multiple sub-laminates oriented at ±45° and 0°, ensuring anisotropic stiffness representative of real composite structures.

A full-scale 9.65 m carbon/epoxy blade (7.65 mm total thickness, layup shown in Fig. 3) was modeled in ANSYS using 2nd-order tetrahedral elements. Singular elements were placed near crack fronts to capture stress intensity. Mesh independence was confirmed (Fig. 6). Root boundary conditions simulated a clamped hub permitting rotation about one axis; operating speed 40 rpm (1.6 MW turbine).

Cracks were modeled at root, mid-span and tip; depths increased from 0 to 400 mm in increments of 50 mm. Modal analyses extracted modes 1–4 (three bending, one torsion).

For the healthy blade, the corresponding frequencies were 9 Hz, 19 Hz, 31 Hz, and 40 Hz, respectively. We define the critical depth as the smallest crack depth where the frequency drop rate increases sharply.

Results and Discussion

At the root, Mode 1 decreased by >6% at 250 mm crack depth. At mid-span, Mode 4 decreased >6% at 300 mm. Near the tip, Mode 4 decreased ≈20% at 400 mm. demonstrate that crack growth induces significant and mode-dependent reductions in natural frequencies. For cracks located near the root, frequency reduction begins as early as 150 mm of crack depth, with a sharp decline observed at 250 mm, particularly in the first bending mode. At this stage, Mode 1 experienced a reduction of more than 6%, whereas higher modes exhibited milder changes, indicating that root cracks primarily affect the bending stiffness of the blade. In the case of mid-span cracks, frequency reductions were delayed until approximately 300 mm crack depth. Both Modes 1 and 4 showed higher sensitivity, with the torsional Mode 4 exhibiting a drop exceeding 6% for deeper cracks. This suggests that the influence of mid-span cracks extends to both bending and torsional behaviors. For cracks near the tip, frequency reduction remained negligible until a depth of about 350 mm, after which Mode 4 became highly sensitive, showing up to 20% reduction at a crack depth of 400 mm. Lower bending modes were only marginally affected in this region, reflecting the localized impact of tip damage on torsional stiffness. A comparison of modal sensitivities reveals that the first bending mode is the earliest and most reliable indicator of root damage, while the torsional mode provides the most effective signal for cracks occurring farther from the root. Modes 2 and 3, by contrast, exhibited relatively smaller frequency variations and are less effective for early damage detection. Overall, the study identifies critical crack depths of 250 mm near the root, 300 mm at mid-span, and 350 mm near the tip, which mark the thresholds where frequency reductions become abrupt and thus demand immediate attention in a health monitoring system.

Conclusions

This study establishes the effectiveness of vibration-based modal analysis as a tool for structural health monitoring of composite wind turbine blades. Using finite element simulations, the relationship between crack growth and natural frequency reduction was quantified. The findings highlight three major contributions:

1. **Critical crack depths:** Distinct thresholds were identified for different blade locations approximately 250 mm near the root, 300 mm at mid-span, and 350 mm near the tip beyond which frequency drops became sharp and significant.
2. **Mode sensitivity:** The results highlighted that bending modes, especially the first mode, are most sensitive to cracks close to the root, while torsional modes are strongly influenced by cracks located toward the tip.
3. **Damage localization:** By observing the behavior of specific modes, it is possible not only to confirm the presence of a crack but also to estimate its approximate location along the blade span.

In conclusion, modal analysis, combined with fracture mechanics principles, provides a reliable and cost-effective approach for real-time health monitoring of wind turbine blades.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

مجله علمی مهندسی مکانیک شریف

https://sjme.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

استفاده از آنالیز مودال جهت پایش سلامت پره‌ی توربین باد

سیدمحمدحسین شریفی * ، غلامرضا راشد و محمدفواد سلامی‌زاده

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده‌ی آبادان، آبادان.

*نویسنده مسئول (sharifi@put.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

واژگان کلیدی:

پایش سلامت،

پره‌ی توربین باد،

رشد ترک،

روش اجزاء محدود،

آنالیز مودال.

چکیده

پایش سلامت ماشین‌های دوار، یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های مهندسی، شامل اندازه‌گیری و تحلیل پارامترهای مؤثر در عملکرد آن‌هاست، که به‌منظور ارزیابی وضعیت فعلی و پیش‌بینی عملکرد آتی دستگاه‌ها انجام می‌شود. از آنجایی‌که خواص رزونانسی یا مودال یک ساختار مکانیکی تحت تأثیر خواص فیزیکی آن است؛ بنابراین، هرگونه تغییر در خواص فیزیکی یک سازه باعث تغییر در پارامترهای مودال آن می‌شود. لذا می‌توان با نظارت پیوسته بر سیستم و پارامترهای آنالیز مودال، وقوع آسیب در سیستم را شناسایی کرد. در نوشتار حاضر، به پایش سلامت پره‌ی توربین باد از جنس کامپوزیت با استفاده از مبانی مکانیک شکست و آنالیز ارتعاشات پرداخته شده است. با پایش بسامد طبیعی مشاهده می‌شود که افت بسامدهای طبیعی پس از عمق مشخصی از ترک شدت گرفته است؛ به‌گونه‌ای که می‌توان پارامتری به‌عنوان عمق ترک بحرانی را معرفی کرد، که با افزایش فاصله‌ی ترک از ریشه‌ی پره افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، عمق بحرانی ترک واقع در نزدیکی ریشه، ۲۵۰ میلی‌متر و برای ترک واقع در نوک پره، ۳۵۰ میلی‌متر بوده است.

۱. مقدمه

پایش سلامت، فرآیندی است که به‌منظور ارزیابی پیوسته و هدفمند از وضعیت سلامت و یکپارچگی سازه‌ها استفاده می‌شود و قادر به تشخیص تغییرها و آسیب‌های احتمالی در ماشین‌ها و سازه‌هاست. هدف اصلی، تشخیص و مکان‌یابی آسیب‌ها، پیش‌بینی طول عمر باقیمانده، افزایش ایمنی، و بهبود برنامه‌ریزی برای نگهداری و کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیرات اضطراری است. برای پایش سلامت از ابزارهای گوناگونی، مانند: حس‌گرها، آزمون‌های غیرمخرب، تحلیل داده‌ها، و یادگیری ماشین استفاده می‌شود. یکی از روش‌های پایش تجهیز، استفاده از شکل مودها و مقادیر بسامدی است، که با استفاده از آنالیز مودال به‌دست می‌آید.

روش‌های NDT ، مانند: جریان گردابی، اولتراسونیک، و ... ، برای تشخیص ترک‌خوردگی در پره‌ها قبل از بروز آسیب، به‌دلایلی همچون بسته‌شدن ترک‌ها در هنگام توقف موتور، نبود اطلاعات دقیق از شرایط واقعی عملیات، عدم آگاهی از علائم اولیه‌ی ترک‌خوردگی و دسترسی دشوار به پره‌ها، کارایی لازم را ندارند.[۱] اگرچه روش‌های تشخیص آسیب بسیاری برای سازه‌های کامپوزیتی وجود دارد، اما برای پره‌های توربین بادی، که در محیط‌های سخت کار می‌کنند و در ارتفاع قرار دارند، به‌دلیل کاربرد ناکافی یا هزینه‌ی بالا دشوار است.[۲] در پژوهشی اثر ناچ در ریشه‌ی پره‌ی کمپرسور توربین گاز با استفاده از روش المان محدود بررسی و نتایج آن با نمونه‌ی تجربی مقایسه شده است. سپس توسط آنالیز مودال، اثر ناچ و رشد آن در شکل مودهای پره تحلیل شده است. نتایج حاکی از تأثیرگذاری طول ناچ در شکل مودهای پره است.[۳] تحلیل شکست در پره‌ای از یک توربین بخار ساخته‌شده از فولاد آلیاژی X۲۰Cr۱۳، که با روش اجزاء محدود انجام شده است، نشان داده است که بیشترین تنش در لبه‌های ریشه‌ی پره رخ داده و همین ناحیه، محل جوانه‌زنی و رشد ترک بوده است. پس از انجام تحلیل اخیر، عمر رشد ترک خستگی محاسبه و با روش‌های تجربی مقایسه شده است.[۴] در مطالعات انجام‌شده بر روی یک نمونه‌ی پره‌ی توربین باد به طول ۱/۲ متر، نتایج تجربی تغییرات پارامترهای مودال در مودهای ۲ الی ۸ را نشان داده است.[۵] همچنین در مطالعه‌ی تجربی گانرویالا[1] و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از آزمون ضربه، پارامترهای مودال مربوط به پره‌ی توربین باد ثبت شده و نتایج نشان داده است که آزمون مودال، رویکردی امیدوارکننده برای تخمین ابعاد ترک است.[۶] با استفاده از روش اجزاء محدود، بررسی اثر ترک و عمق ترک در مدل ساده‌سازی‌شده‌ی پره‌ی توربین گاز در مقادیر عددی بسامد طبیعی پره‌ی داغ توربین گاز صورت گرفته و این نتیجه ارائه شده است که با روند افت بسامد طبیعی پس از عمقی مشخصی از ترک، افت بسامدهای طبیعی شدت می‌گیرد و می‌توان عمق ترک مذکور را به‌عنوان

[1] Ganeriwala

استناد به این مقاله:

شریفی، سیدمحمدحسین، راشد، غلامرضا و سلامی زاده، محمدفواد، ۱۴۰۵. استفاده از آنالیز مودال جهت پایش سلامت پره‌ی توربین باد. مهندسی مکانیک شریف، ۴۲(۱)، صص.۱۷-۲۵.
https://doi.org/10.24200/j40.2025.67449.1745

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۴۷۳۳- ۲۶۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

Laminate, Thickness=7.65	Sublaminate, Thickness =0.92	Lamina, Angle=45, Thickness =0.46
		Lamina, Angle =-45, Thickness =0.46
	Sublaminate, Thickness =5.81	Lamina, Angle =0, Thickness =0.83
		Lamina, Angle =0, Thickness =0.83
		Lamina, Angle =0, Thickness =0.83
		Lamina, Angle =0, Thickness =0.83
		Lamina, Angle =0, Thickness =0.83
		Lamina, Angle =0, Thickness =0.83
		Lamina,Angle =0, Thickness =0.83
	Sublaminate, Thickness =0.92	Lamina, Angle =45, Thickness =0.46
		Lamina, Angle =-45, Thickness =0.46

Fig. 3(a). Material layering according to the angle of the substrate (thicknesses are in millimeters and angles are in degrees).

شکل ۳(a). نحوه‌ی لایه‌چینی ماده با توجه به زاویه‌ی قرارگیری زیرلایه‌ها. (واحد ضخامت‌ها به میلی‌متر و زاویه‌ها به درجه هستند).

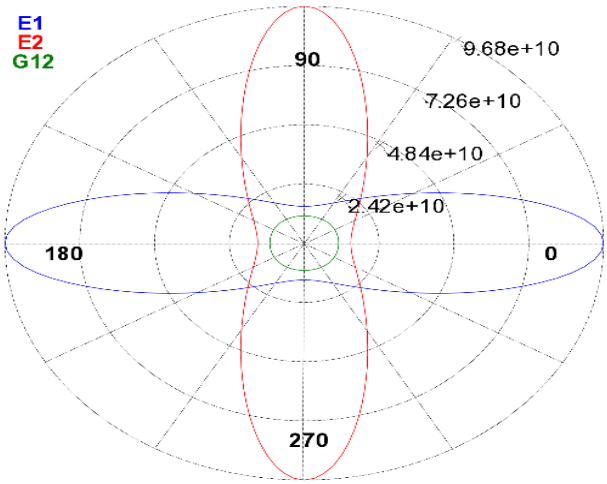

Fig. 3(b). Polar mechanical properties of the material. (Young's modulus and shear modulus values are Pascal and angles are degrees).

شکل ۳(b). خواص مکانیکی قطبی ماده. (واحد مقادیر مدول یانگ و مدول برشی به پاسکال، و زاویه‌ها به درجه هستند).

است توزیع تنش در نواحی بحرانی، مانند سوراخ‌ها و نوک ترک را دقیق‌تر بازسازی کند. این قابلیت باعث نمایش بهتر تمرکز تنش می‌شود. لذا المان مذکور جهت شبیه‌سازی ترک در نرم‌افزار انسیس استفاده می‌شود.[۱۳] مدل شبکه‌بندی‌شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

شرایط مرزی اعمال‌شده براساس توربین ۱/۶ مگاوات با ۴۰ دور بر دقیقه اعمال شده است. قید اعمال‌شده بر ریشه‌ی پره به گونه‌ای بوده است که در راستاهای اصلی مقید بوده و فقط امکان دوران حول یک محور را داشته باشد (شکل ۵). با انجام تحلیل تنش بر روی نمونه‌ی بدون ترک و بررسی کانتور تنش فون مایزز، نواحی مستعد جوانه‌زنی و رشد ترک مشخص شده است. در شکل‌های

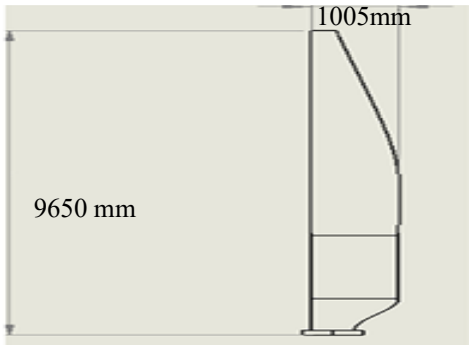

Fig. 1. 2D draw of blade.

شکل ۱. هندسه‌ی پره‌ی مدل‌سازی‌شده.

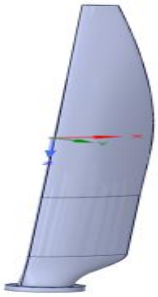

Fig. 2. Geometry of blade.

شکل ۲. مدل سه‌بُعدی پره.

عمق ترک بحرانی معرفی کرد.[۷] همچنین با توجه به شکل مودهای حاصل‌شده از آنالیز مودال پره‌ی توربین گاز می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ابزار آنالیز مودال هنگامی اثربخش‌تر است، که مودهای پیچشی ملاک قرار گیرند.[۸] در مطالعه‌ی موردی دورینت[۲] و همکاران (۲۰۱۴)، در زمینه‌ی پایش سلامت توربین باد در بلژیک، نشان داده شده است که استفاده از تجهیزات ارتعاشی و روش‌های پیشرفته‌ی تحلیل مودال عملیاتی مانند PolyMAX می‌توان تغییرات کوچک در رفتار دینامیکی توربین‌ها را ردیابی و به بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کرد.[۹]

۲. مدل‌سازی

مدل استفاده‌شده در شبیه‌سازی عددی، مطابق شکل ۱ در نرم‌افزار انسیس ایجاد شده است، که در شکل ۲ مدل سه‌بُعدی آن نیز مشاهده می‌شود.[۱۰]

برای مدل‌سازی از کامپوزیت کربن/ اپوکسی به ضخامت ۷/۶۵ میلی‌متر استفاده شده است؛ که وزن پایین و در عین حال مقاومت بالای آن باعث شده است که در صنایع گوناگونی، از جمله: خودروسازی، صنایع هوافضا، ساختمان‌سازی، و وسایل ورزشی کاربرد بسیار داشته باشد. در شکل ۳ (a و b) به ترتیب لایه‌چینی و خواص مکانیکی قطبی ماده مشاهده می‌شود.[۱۱] خواص مکانیکی قطبی به ویژگی‌هایی از یک ماده اشاره دارد که در راستاهای مختلف نسبت به یک محور قطبی یا مختصات قطبی متفاوت هستند. این مفهوم در مواد ناهمسانگرد مانند کامپوزیت‌ها اهمیت زیادی دارد.[۱۲]

برای انجام تحلیل تنش در بدنه‌ی پره از المان هرمی مرتبه‌ی دوم استفاده شده است؛ که به‌دلیل وجود گره‌های میانی روی لبه‌ها، هندسه‌ای منطبق با سطوح منحنی و جزئیات هندسی دارد. همچنین به کمک توابع درجه‌ی دوم، قادر

[2] Devriendt

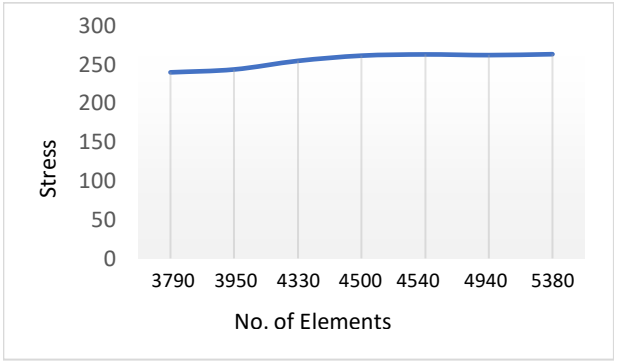

Fig. 6. Mesh indepency.

شکل ۶. نمودار استقلال از شبکه.

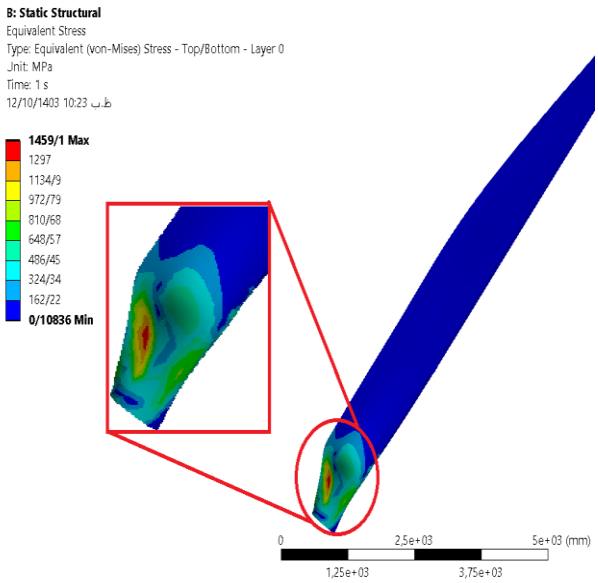

Fig. 7. Von-mises stress contour.

شکل ۷. کانتور توزیع تنش فون‌مایزز در پره.

آسیب، جوانه‌زنی، و رشد ترک در مناطق میانی و انتهایی پره وجود دارد.[۱۶] لذا جهت بررسی کامل‌تر رفتار مودال، ترک‌هایی نیز در میانه و نزدیک به نوک پره مدل‌سازی شده‌اند. شکل‌های ۸ (a، b، و c)، نمایشگر محل‌های قرارگیری ترک هستند؛ که در آن‌ها، ترک با خط زرد رنگ AA' نمایش داده شده است.

۳. بررسی نتایج

با انجام آنالیز مودال، چهار شکل مود اول برای پره‌ی بدون ترک به‌دست آمده است، که در شکل ۹ (a، b، c، و d) مشاهده می‌شوند. شکل ۹(a) با یک گره در انتها، نماینده‌ی مود اول خمشی است، که معمولاً در بسامدهای پایین ظاهر می‌شود. همچنین شکل‌های ۹ (b و c)، به ترتیب با ۲ و ۳ گره، نماینده‌ی مودهای دوم و سوم خمشی هستند و می‌توانند به شکل‌های پیچیده‌تری از انحنا منجر شوند. شکل ۹(d)، نماینده‌ی مود اول پیچشی است؛ که معمولاً در بسامدهای بالاتر ظاهر می‌شود و به‌عنوان یکی از مودهای بحرانی در طراحی سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود.[۱۷] بسامدهای طبیعی مرتبط با چهار مود اخیر نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

برای بررسی اثر عمق ترک در بسامدهای طبیعی، نسبت اندازه‌ی تغییر بسامد به مقدار بسامد اولیه‌ی هر مود ($\frac{\Delta f}{f}$) به ازاء عمق ترک‌های مختلف (از ۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر)، در شکل‌های ۱۰ (a، b، و c) مشاهده می‌شوند.

Fig. 4. Applied Mesh.

شکل۴. مدل شبکه‌بندی‌شده.

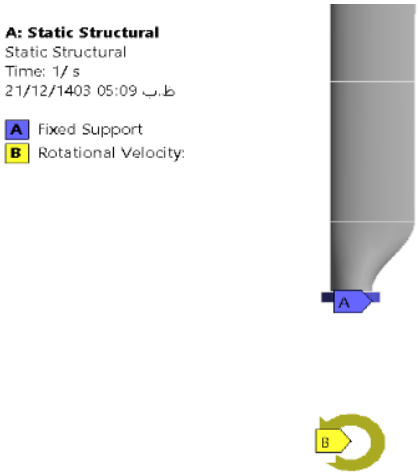

Fig. 5. Boundary Conditions.

شکل ۵. شرایط مرزی اعمال‌شده.

۶ و ۷، به ترتیب نمودار استقلال از شبکه و کانتور توزیع تنش فون مایزز مشاهده می‌شوند.

مطابق شکل ۶ از ۴۵۰۰ المان به بعد، افزایش تعداد المان‌ها تأثیری در پاسخ ندارد. همچنین، مطابق شکل ۷، نقطه‌ی بحرانی مستعد جوانه‌زنی ترک به ریشه‌ی نزدیک است. مطالعات مشابه در این زمینه نیز نتایج مشابه به‌دست آورده‌اند.[۳ و ۱۴]

در تحلیل مکانیک شکست، روش بلوک ترک استفاده شده است؛ که در آن، از المان‌های تکین و هرمی درجه دوم در نواحی اطراف و نوک ترک استفاده می‌شود. رابطه‌ی ۱، نشانگر میدان تنش در اطراف ترک برای مود اول است؛ که در آن، σ_{ij} مؤلفه‌های تنش در مختصات قطبی نسبت به نوک ترک، r فاصله از نوک ترک، θ زاویه‌ی نسبت به امتداد ترک، K_I ضریب شدت تنش برای مود اول، و $f_{ij}(\theta)$ توابع وابسته به زاویه هستند. همچنین در آن، $\frac{1}{\sqrt{r}}$ مشخص‌کننده‌ی رفتار تکین تنش نزدیک نوک ترک است.

$$\sigma_{ij}(r,\theta)=f_{ij}(\theta)\ \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \qquad (1)$$

از آنجا که المان‌های چهاروجهی استاندارد قادر به بازتولید رفتار $\frac{1}{\sqrt{r}}$ در اطراف و نوک ترک نیستند، المان‌های سینگولار جهت بازنمایی دقیق میدان تنش در اطراف نوک ترک استفاده می‌شوند.[۱۵] در مرحله‌ی نخست، ترک با عمق‌های متفاوت شبیه‌سازی و با استفاده از آنالیز مودال، بسامد پاسخ مربوط به هر مود استخراج شده است. همچنین به‌دلیل وجود بارهای دینامیکی و خستگی، امکان

جدول ۱. بسامد طبیعی پره بدون ترک برای ۴ مود اول.

Table 1. Natural Frequencies of normal blade in 4 first modes.

Mode	Frequency (Hz)	Type
1	9	Bending
2	19	Bending.
3	31	Bending.
4	40	Torsion

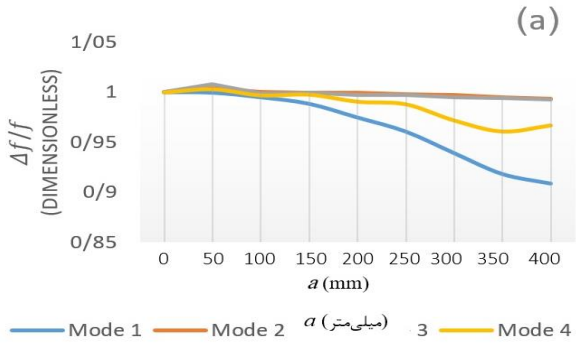

Fig. 10(a). Graph of the ratio of the change in natural frequency to the initial value as a function of crack depth for a crack near to the root.

شکل۱۰(a). نمودار نسبت تغییر بسامد طبیعی به مقدار اولیه بر حسب عمق ترک برای ترک نزدیک به ریشه.

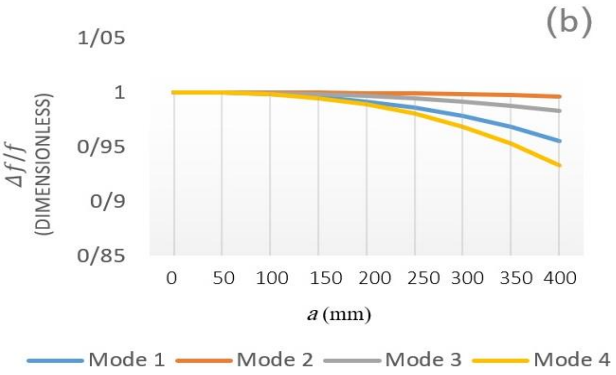

Fig. 10(b). Graph of the ratio of the change in natural frequency to the initial value as a function of crack depth for a crack in the middle.

شکل ۱۰(b). نمودار نسبت تغییر بسامد طبیعی به مقدار اولیه برحسب عمق ترک برای ترک میانه‌ی پره.

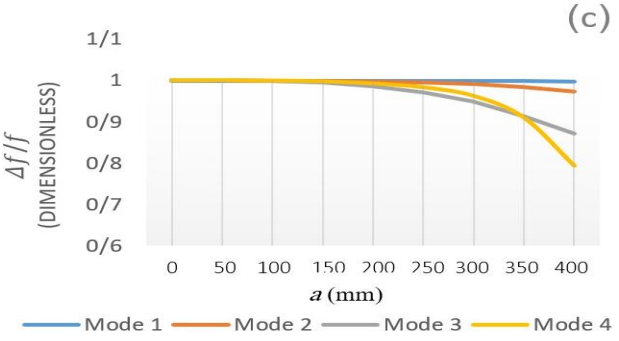

Fig. 10(c). Graph of the ratio of the change in natural frequency to the initial value as a function of crack depth for a crack near the tip.

شکل۱۰(c). نمودار نسبت تغییر بسامد طبیعی به مقدار اولیه برحسب عمق ترک برای ترک نزدیک به نوک پره.

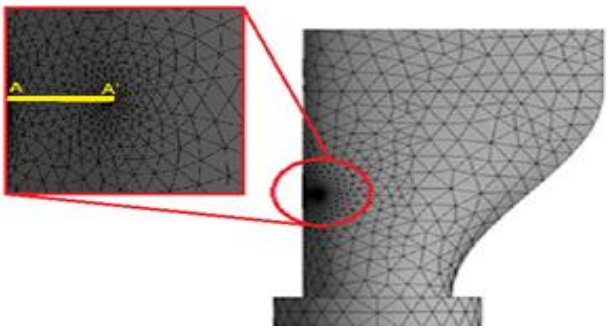

Fig. 8(a). Location of crack near to root.

شکل ۸(a). محل قرارگیری ترک در نزدیکی ریشه‌ی مقیدشده.

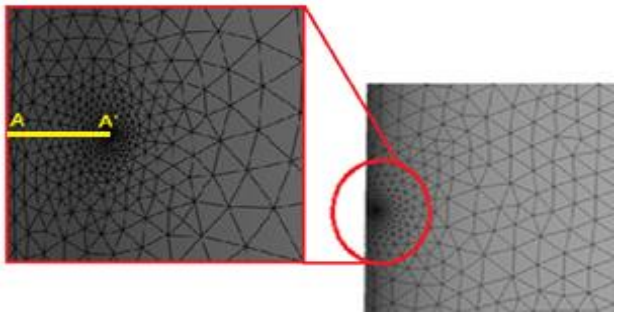

Fig. 8(b). Location of crack in the middle of blade.

شکل۸(b). محل قرارگیری ترک در میانه‌ی پره.

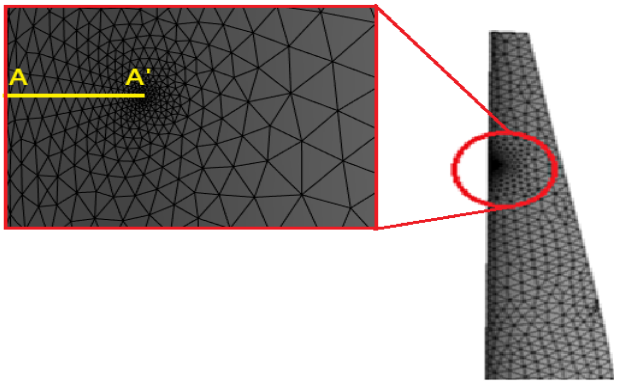

Fig. 8(c). Location of crack near to tip.

شکل ۸(c). محل قرارگیری ترک در نزدیکی نوک پره.

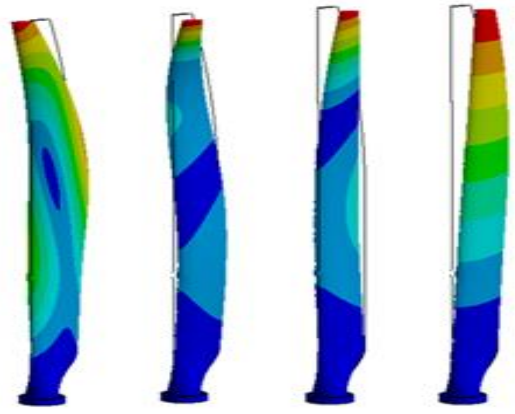

Fig. 9. Mode shapes of normal blade: (a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3, (d) Mode 4.

شکل ۹. شکل مودهای پره بدون ترک: (a) مود ۱، (b) مود ۲، (c) مود ۳، (d) مود ۴.

در شکل ۱۰(a) می‌توان مشاهده کرد که برای اغلب مودها، کاهش بسامد تا طول ترک حدود ۲۵۰ میلی‌متر نسبتاً ملایم و خطی بوده است؛ ولی پس از آن، افت بسامد به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ لذا می‌توان طول ترک ۲۵۰ میلی‌متر را به‌عنوان یک نقطه‌ی بحرانی عمومی در نظر گرفت. با این حال، مود اول رفتاری متفاوت داشته و کاهش بسامد آن از حدود ۱۵۰ میلی‌متر آغاز شده است، به‌طوری که افت بسامد مود اول در مقایسه با سایر مودها زودتر و شدیدتر اتفاق افتاده است. این موضوع نشان می‌دهد که مود ۱، حساس‌ترین مود به حضور و رشد ترک در ناحیه‌ی مذکور است. همچنین با درنظرگرفتن شکل‌های ۱۰(b و c)، که به ترتیب مربوط به ترک‌های قرارگرفته در وسط و نزدیک به نوک پره هستند، نیز می‌توان اذعان کرد که برای ترک‌های قرارگرفته در وسط و نزدیک به نوک پره، طول ترک بحرانی به ترتیب ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی‌متر بوده است. داده‌های اخیر برای تجزیه‌وتحلیل و بررسی خرابی پره مهم است و عملکرد پایدار توربین به تجزیه‌وتحلیل اطلاعات ذکرشده برای پره بستگی دارد.

بررسی شکل‌های ۱۰(a الی c) حاکی از آن است که هر چه ترک به ریشه‌ی پره نزدیک‌تر باشد، افت بسامد زودتر آغاز شده و طول بحرانی ترک نیز کمتر بوده است.

تا پیش از نقطه‌ی بحرانی، کاهش مقادیر بسامد بر حسب طول ترک تغییر چشمگیری نداشته و نامحسوس بوده است؛ در حالی که بعد از نقطه‌ی بحرانی، یعنی برای ترک‌های با عمق ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر برای ترک نزدیک به ریشه،۳۵۰ و ۴۰۰ میلی‌متر برای ترک‌های قرارگرفته در وسط پره و ۴۰۰ میلی‌متر برای ترک نزدیک به نوک پره، کاهش بسامد چشمگیر بوده است و می‌توان کاهش اخیر را بر حسب درصد در شکل‌های ۱۱(a الی c) مشاهده کرد.

با بررسی شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که برای ترک نزدیک به ریشه، بیشترین افت بسامد در مود اول و کمترین افت بسامد در مودهای دوم، سوم، و چهارم رخ داده‌اند؛ به‌طوری که با تغییر ۵۰ میلی‌متری طول ترک در سه مرحله، مود اول به ترتیب بیش از ۲٪، بیش از ۴٪، و بیش از ۶٪ افت بسامد را تجربه کرده است. همچنین برای ترک واقع در میانه‌ی پره، به ازاء تغییر طول یکسان در هر مرحله، به ترتیب مودهای چهارم و اول بیشترین افت را داشته‌اند. به‌طوری که مود چهارم در هر مرحله به ترتیب بیش از ۴٪ و بیش از ۶٪ افت مقادیر بسامد را تجربه کرده است. برای ترک واقع در نزدیکی نوک پره، بیشترین افت بسامد به ترتیب در مودهای چهارم و سوم رخ داده است؛ که در این حالت، مود چهارم بیشترین افت مقادیر بسامدی را تجربه کرده است. همچنین، به ازاء افزایش ۵۰ میلی‌متری طول ترک، حدود ۲۰٪ افت مقادیر بسامدی را تجربه کرده است.

مطابق جدول ۲، با دورشدن ترک از ریشه‌ی پره، درصد افت بسامد در مودهای پایین کاهش و در مودهای بالاتر افزایش یافته است. به‌گونه‌ای که ترک واقع در نزدیکی نوک پره، با وجود داشتن طول یکسان، در مودهای پایین، تأثیر چشمگیری نداشته است؛ اما در مود چهارم باعث افتی بیش از ۲۰٪ در بسامد طبیعی شده است، که می‌تواند منجر به وقوع تشدید در بسامدهای بالاتر شود. در مقابل، ترک واقع در نزدیکی ریشه‌ی پره با افتی بیش از ۵٪، بیشترین تأثیر را در مود اول داشته است. لذا، با درنظرگرفتن بسامد تشدید زودهنگام پره می‌توان حدود مکان ترک را تخمین زد. این موضوع در پایش برخط وضعیت

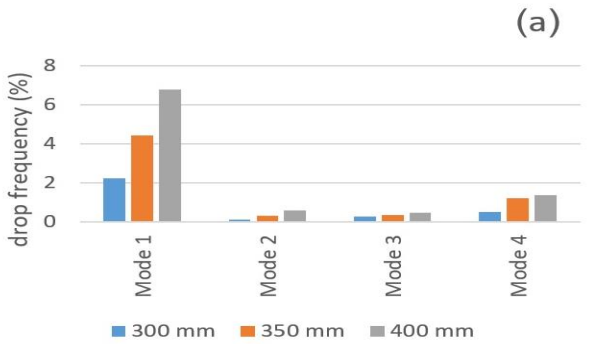

Fig. 11(a). Percentage drop in frequency of modes after critical length for a crack near the root.

شکل ۱۱(a). نمودار درصد افت بسامد مودها پس از طول بحرانی برای ترک نزدیک به ریشه.

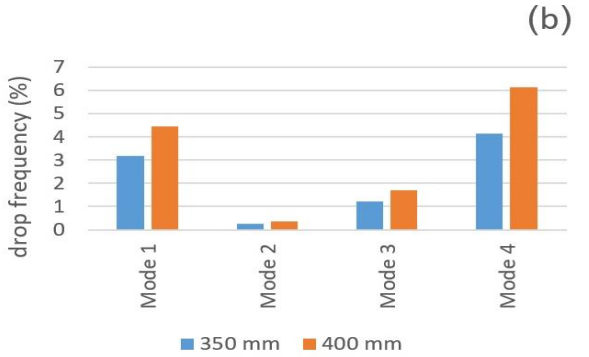

Fig. 11(b). Percentage drop in frequency of modes after critical length for a crack in the middle.

شکل ۱۱(b). نمودار درصد افت بسامد مودها پس از طول بحرانی برای ترک میانه‌ی پره.

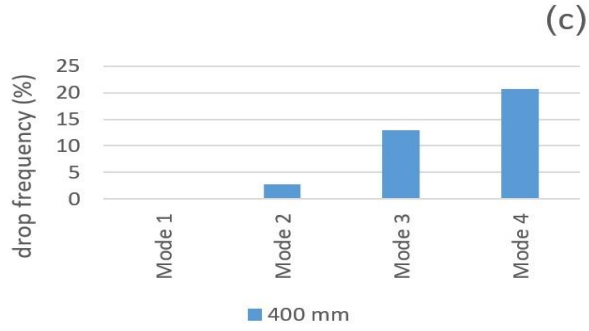

Fig. 11(c). Percentage drop in frequency of modes after critical length for a crack near the tip.

شکل ۱۱(c). نمودار درصد افت بسامد مودها پس از طول بحرانی برای ترک نزدیک به نوک پره.

جدول ۲. درصد افت بسامد طبیعی به ازاء طول ترک ۴۰۰ میلی‌متر در موقعیت‌های مختلف.

Table 2. Percentage of natural frequency drop for a crack length of 400 mm at different positions.

Mode	Root	Middle	Near Tip
1	6.8	4.46	0.02
2	0.85	0.37	2.72
3	0.46	1.71	12.90
4	1.40	6.72	20.71

دستگاه، اهمیت بسیاری دارد. در مطالعه‌ی صورت‌گرفته بر روی پره‌ی توربین گاز، با قراردادن ناچ در فواصل متفاوت از ریشه‌ی پره، نتیجه‌ای مشابه حاصل شده است.[۱۸]

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به اهمیت پایش سلامت برای توربین باد جهت اندازه‌گیری، ثبت، تحلیل، و ارزیابی پارامترهای مؤثر در رفتار و عملکرد توربین در طول زمان و ارزیابی وضعیت فعلی و پیش‌بینی عملکرد آینده‌ی دستگاه، همچنین با توجه به عدم امکان استفاده از آزمون‌های غیرمخرب برای پره‌های توربین باد در حین عملیات، در نوشتار حاضر، آنالیز مودال با استفاده از روش المان محدود به‌عنوان ابزاری جهت پایش سلامت یک پره‌ی توربین باد در نظر گرفته شده است، که اهم نتایج به این صورت بوده است:

- وجود یک طول بحرانی برای ترک در هر سه موقعیت ریشه، میانه، و نوک پره به‌وضوح در نمودارهای تغییر بسامد قابل شناسایی است. برای ترک نزدیک به ریشه، افت بسامد از عمق حدود ۱۵۰ میلی‌متر آغاز شده و در عمق ۲۵۰ میلی‌متر شدت گرفته است. در حالی که برای ترک در وسط و نوک پره، این طول بحرانی به ترتیب به حدود ۳۰۰ و ۳۵۰ میلی‌متر رسیده است. بنابراین، ترک‌های نزدیک ریشه حساس‌تر و در طول‌های کوتاه‌تری قابل شناسایی هستند.

- بررسی درصد افت بسامد نشان داده است که هر مود با توجه به موقعیت و طول‌های مختلف ترک، رفتار متفاوتی دارد. برای ترک واقع در ریشه، مود اول بیشترین افت (حدود ۶٪) را داشته و سریع‌تر از سایر مودها نسبت به رشد ترک واکنش نشان داده است. در مقابل، برای ترک در نزدیکی نوک پره، مود چهارم به شدت حساس بوده و افت حدود ۲۰٪ در بسامد طبیعی را تجربه کرده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که پایش مودهای بالاتر برای ترک‌های دور از ریشه کاراتر بوده است.

- نتایج حاکی از آن است که با دورشدن ترک از موقعیت ریشه‌ی پره، افت بسامد در مودهای پایین کاهش و در مودهای بالاتر افزایش یافته است. این ویژگی می‌تواند در طراحی سیستم پایش برخط استفاده شود و در صورت وقوع تشدید در مودهای خاص، می‌توان موقعیت تقریبی ترک را براساس بسامد مشاهده‌شده تخمین زد.

References – منابع

1. M.Witos, Mi. Stefaniuk, compressor blade fatigue Witos, M. and Stefaniuk, M., 2011. Compressor blade fatigue diagnostics and modelling with the use of modal analysis. *Fatigue of Aircraft Structures.* https://doi.org/10.2478/v10164-010-0044-4
2. Cao, Z., Cao, A., Zhang, Q. and Wang, Y., 2022. Formation mechanism and detection and evaluation methods as well as repair technology of crack damage in fiber-reinforced composite wind turbine blade: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 120(9)*, pp.5649–5672. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09230-z
3. Sharifi, S.M.H., Edalat, P., Vardi, A.R. and Tabasi, S 2022. An experimental and numerical investigation of the effect of notches on the root of gas turbine compressor blades on critical speeds. *Journal of Failure Analysis and Prevention, 22(4)*, pp.1733–1743. https://doi.org/10.1007/s11668-022-01278-0
4. Plesiutschnig, E., Hinteregger, M. and Mayrhofer, D., 2016. Fracture analysis of a low-pressure steam turbine blade. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 5, pp.39–50. https://doi.org/10.1016/j.csefa.2016.02.001
5. Ganeriwala, S.N., Li, X. and Espinoza, H., 2011. Using modal analysis for detecting cracks in wind turbine blades. *Sound and Vibration, 45(5)*, pp.10 https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9428-8_42
6. Abdulraheem, K.F. and Al-Kindi, G., 2017. A simplified wind turbine blade crack identification using experimental modal analysis (EMA). *International Journal of Renewable Energy Research, 7(2)*, pp.715–722. https://doi.org/10.20508/ijrer.v7i2.5617.g7052
7. Sharifi, S.M.H., Vardi, A.R. and Salamizadeh, M.F., 2024. Investigation of the effect of crack growth at the root of a hot gas turbine blade on the blade's natural frequencies. In 8th International Conference on Technology Development in Mechanical and Aerospace Engineering. (In Persian)
8. Sharifi, S.M.H. and Salamizadeh, M.F., 2024. Health monitoring using modal analysis – a case study of a gas turbine blade. In The Third International

Conference of Mechanical and Aerospace Engineering Students. (In Persian)

9. Devriendt, C., Guillaume, P., Vanlanduit, S. and Verboven, P., 2014. Structural health monitoring of offshore wind turbines using automated operational modal analysis. *Structural Health Monitoring, 13(6)*, pp.644–659. https://doi.org/10.1177/1475921713517126
10. Abbott, I.H. and Von Doenhoff, A.E., 1959. Theory of wing sections: including a summary of airfoil data. *Dover Publications*, New York, USA. https://doi.org/10.1017/s0368393100116724
11. Barr, S. and Jaworski, J., 2019. Optimization of tow-steered composite wind turbine blades for static-aeroelastic performance. *Renewable Energy, 135*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.125
12. Gibson, R.F., 2016. *Principle of composite material mechanics. 4th ed. CRC Press*, Boca Raton, USA. https://doi.org/10.1201/b19626
13. ANSYS Corporation, 2023. *ANSYS theory manual reference*. ANSYS Inc.
14. Appadurai, M. and Fantin Irudaya Raj, E., 2021. Finite element analysis of composite wind turbine blades. *In 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, IEEE. https://doi.org/10.1109/icees51510.2021.9383769
15. Anderson, T.L., 2017. *Fracture mechanics: fundamentals and applications. 4th ed. CRC Press*, Boca Raton, USA. https://doi.org/10.1201/9781315370293-16
16. McGugan, M., Sørensen, B.F. and Branner, K., 2015. Damage tolerance design of wind turbine blades for improved reliability. *Wind Energy, 18(4)* https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0077
17. Chopra, A.K., 2017. *Dynamics of structures. 5th ed. Pearson*, London, UK.
18. Heidari, S., Shafiee, M. and Javanbakht, A., 2018. Estimation of reliability and lifetime of gas turbine blades using modal analysis. *M.Sc. thesis, Sharif University of Technology*.

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.