

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Evaluation of the sensitivity of natural frequencies of gas turbine blades to crack growth at the root

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Seyed Mohammad Hosein Sharifi*

Department of Mechanical Engineering,
Abadan Faculty, Petroleum University
of Technology, Khuzestan, Iran.

Mohammad Fuad Salamizadeh

Department of Mechanical Engineering,
Abadan Faculty, Petroleum University
of Technology, Khuzestan, Iran.

AliReza Vardi

Mapna Groupe, Tehran, Iran

¹

* **Correspondence**

Sharifi@put.ac.ir

Article History

Received: 07 Feb, 2026

Accepted: 15 Jun, 2026

ePublished: 22 Jun, 2026

ABSTRACT

Gas turbine blade health monitoring is of critical importance due to the severe operating conditions and catastrophic failure consequences. This paper aims to develop a non-destructive vibration-based diagnostic index to investigate the effect of root crack growth on its natural frequencies. Using the finite element method in finite element software, a simplified 3D model of a gas turbine blade with Siemens V94.2 turbine operating conditions under realistic combined thermal-mechanical loading is created. Stress analysis in the uncracked state identified the blade-body connection area as the most susceptible area for crack initiation. In the next step, a programmatic modal analysis was performed for different depths of an edge crack from 0.5 to 4.5 mm. The results constructed a critical crisis at a depth of approximately 2 mm, such that the natural frequencies are mild before this point, and nonlinear and severe after it. Also, the vibration stories were different; Thus, the second mode with 25% reduction, the highest percentage of frequency reduction, was found to be the sensitive index for tracking the most advanced damage. These findings indicate that monitoring the change in natural frequencies, especially in sensitive modes, can be used as an efficient tool in the design development of predictions for early crack detection and prevention of potential failure.

Keywords: Crack Growth, Modal Analysis, Finite Element Method, Health Monitoring, Turbine Blade

ارزیابی حساسیت فرکانس‌های طبیعی پره توربین گاز به رشد ترک در ریشه

سید محمد حسین شریفی *

دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، ایران

محمد فؤاد سلامی زاده

دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، ایران

علیرضا وردی

مپنا، تهران، تهران، ایران

فرکانس‌های طبیعی، به‌ویژه در مودهای حساس، می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در استراتژی نگهداری پیش‌بینانه برای تشخیص زود هنگام ترک و جلوگیری از شکست ناگهانی پره به کار رود.

کلید واژه‌ها

رشد ترک، آنالیز مودال، روش اجزاء محدود، پایش سلامت، پره توربین

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

* نویسنده مسئول: sharifi@put.ac.ir

۱ مقدمه

پره‌ها از حساس‌ترین اجزای توربین‌های گازی به شمار می‌روند. به دلیل شرایط عملیاتی ویژه و حضور عوامل مختلفی نظیر بارهای حرارتی و مکانیکی و همچنین اندرکنش سازه و سیال، این اجزا مستعد ایجاد ترک و شکست هستند. به منظور جلوگیری از آسیب‌های جدی به تجهیز، انجام بازرسی‌های مستمر و پایش مداوم وضعیت پره‌ها امری ضروری است. یکی از روش‌های مؤثر در پایش سلامت این تجهیزات، استفاده از شکل مودها و مقادیر فرکانس‌های طبیعی مرتبط با آن‌هاست که از طریق آنالیز مودال به دست می‌آیند. با توجه به شرایط کاری این تجهیزات گران‌قیمت و حضور نیروهای محوری و شعاعی همراه با تنش‌های حرارتی، تحلیل و ارزیابی مداوم آن‌ها می‌تواند از بروز خاموشی‌های ناگهانی و خسارات گسترده جلوگیری کند.

پره‌ها به عنوان اجزای حیاتی در سیستم‌های دوار مانند توربین‌های گازی و بادی، به دلیل بارگذاری‌های دینامیکی شدید، همواره در معرض خطر خستگی و رشد ترک هستند [۱]. تحلیل ارتعاشات و تغییرات پارامترهای مودال (از جمله فرکانس طبیعی و میرایی) ابزاری قدرتمند برای پایش سلامت این سازه‌ها ارائه می‌دهد، به‌گونه‌ای که پژوهش‌های اخیر کاهش فرکانس طبیعی و افزایش

چکیده

پایش سلامت پره‌های توربین گاز به دلیل شرایط عملیاتی شدید و پیامدهای خرابی فاجعه‌بار، از اهمیت حیاتی برخوردار است. این مقاله با هدف توسعه یک شاخص تشخیصی غیرمخرب بر پایه ارتعاش، به بررسی تأثیر رشد ترک در ناحیه ریشه پره بر فرکانس‌های طبیعی آن می‌پردازد. با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار المان محدود، یک مدل سه‌بعدی ساده سازی شده از پره توربین گاز با شرایط کاری توربین زیمنس V94.2 تحت بارگذاری ترکیبی حرارتی-مکانیکی واقع‌گرایانه ایجاد شد. تحلیل تنش در حالت بدون ترک، ناحیه اتصال ریشه به بدنه پره را به عنوان مستعدترین منطقه برای آغاز ترک شناسایی کرد. در مرحله بعد، تحلیل مودال پارامتریک برای عمق‌های مختلف یک ترک لبه‌ای از ۰.۵ تا ۴.۵ میلی‌متر انجام شد. نتایج یک آستانه بحرانی در عمق تقریبی ۲ میلی‌متر را آشکار ساخت، به‌طوری که کاهش فرکانس‌های طبیعی پیش از این نقطه خطی و ملایم، و پس از آن غیرخطی و شدید است. همچنین، حساسیت مودهای ارتعاشی متفاوت بود؛ به‌طوری که مود دوم با ۲۵٪ کاهش، بیشترین درصد کاهش فرکانس، حساس‌ترین شاخص برای ردیابی رشد آسیب شناخته شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رصد تغییرات

توربین‌های گازی از جمله ماشین‌های دوار پرکاربرد در حوزه‌هایی مانند تولید برق، هوافضا و صنایع نفت و گاز هستند. این توربین‌ها معمولاً از دو بخش اصلی، کمپرسور و توربین، تشکیل شده‌اند که هر یک شامل مجموعه‌ای از پره‌ها با وظیفه تبادل انرژی میان شفت چرخان و سیال عامل بوده و در سرعت‌های چرخشی بسیار بالا عمل می‌کنند [۱۱]. راندمان و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها به عواملی همچون طراحی توربین، شرایط کاری، اثرات محیطی و راهبردهای نگهداری وابسته است [۱۲-۱۴].

پره‌های توربین گازی در محیط‌های عملیاتی بسیار سخت فعالیت می‌کنند و در معرض تنش‌های ترکیبی مکانیکی و حرارتی، از جمله نیروهای گریز از مرکز، بارهای آیرودینامیکی، گرادیان‌های دمایی و خستگی چرخه‌ای قرار دارند. این شرایط، آن‌ها را نسبت به خرابی‌های ساختاری، به‌ویژه ترک‌های خستگی، آسیب‌پذیر می‌سازد. ترک‌ها با ایجاد تمرکز تنش، عمر خستگی پره را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و اغلب در نواحی بحرانی سازه آغاز می‌شوند؛ از این‌رو، درک رفتار دینامیکی پره‌ها در حضور چنین نواقصی برای پیشگیری از شکست‌های فاجعه‌بار اهمیت زیادی دارد [۱۵].

مدل‌های اجزای محدود، علی‌رغم توانایی بالا در پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های سازه‌ای، به دلیل پیچیدگی فرآیند مدل‌سازی و نیاز به محاسبات سنگین، همواره با چالش‌هایی همراه هستند. بنابراین، به‌منظور افزایش دقت مدل و کاهش اختلاف میان نتایج عددی و داده‌های تجربی، از روش‌های به‌روزرسانی و کالیبراسیون پارامترها استفاده می‌شود [۱۶]. این مدل‌ها در حوزه‌هایی نظیر پایش سلامت سازه‌ها و ماشین‌آلات، تشخیص خرابی و ارزیابی ساختاری کاربرد گسترده‌ای یافته و طی دهه‌های اخیر به یکی از ابزارهای متداول در فرآیند طراحی تبدیل شده‌اند [۱۷].

تحقیقات انجام‌شده بر روی پره‌های معیوب توربین گاز نشان داده‌اند که عواملی همچون تخریب مواد، فرسایش، افزایش بیش از حد دما و ایجاد نقاط داغ موضعی از علل اصلی آسیب در این اجزا هستند؛ نتایجی که عموماً از ترکیب روش‌های تجربی و عددی

میرایی را نشانه‌های کلیدی گسترش ترک معرفی کرده‌اند [۲]. استفاده از منحنی‌های گودمن و S-N در کنار داده‌های ارتعاشی، رویکردی استاندارد برای تخمین عمر باقیمانده پره‌ها تحت بارهای خستگی ارائه می‌دهد [۳]. با این حال، استخراج دقیق این پارامترها به دلیل چالش‌هایی نظیر کم‌نمونه‌برداری سیگنال و شرایط کاری غیرخطی، نیازمند روش‌های پیشرفته‌ای مانند نمایش‌های تطبیقی تنک و تکنیک‌های بهبودیافته نیم‌قدرت است تا از تشخیص نادرست ترک جلوگیری شود [۴].

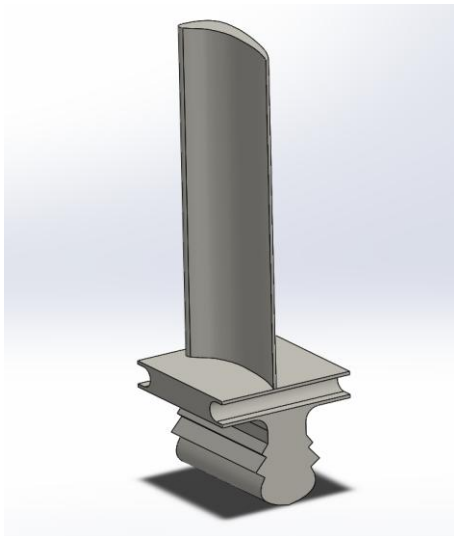
در تحقیقات پیشین، رشد ترک خستگی با استفاده از قانون پاریس برای منحنی S-N مورد بررسی قرار گرفت و یک رابطه درونیاب تعمیم‌یافته ارائه شد [۵]. همچنین، امکان شکست خستگی ناشی از ارتعاشات در پره‌های کمپرسور توربین هوایی به‌صورت تجربی بررسی شد و طی آزمایش خستگی، رشد ترک ناشی از ارتعاشات خمشی ایرفویل پره‌ها مشاهده گردید [۶]. در ادامه، پره کمپرسور توربین گاز GE-F6 در حضور دو ترک نیم‌بیضی تحلیل شد؛ نتایج نشان داد که ترک دوم تأثیر مستقیمی بر شدت تنش نهایی ندارد، اما روند رسیدن ترک به طول بحرانی را تسهیل می‌کند [۷].

در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل شکست پره یک توربین بخار ساخته‌شده از فولاد آلیاژی X20Cr13 با استفاده از روش اجزای محدود انجام شد. نتایج بیانگر آن بود که بیشترین تنش در لبه‌های ریشه پره ایجاد شده و جوانه‌زنی و رشد ترک عمدتاً در همین ناحیه رخ می‌دهد. همچنین عمر رشد ترک خستگی محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه شد [۸]. بررسی شکست در ردیف اول یک توربین گاز ۳۰ مگاواتی نیز با بهره‌گیری از بازرسی چشمی، آنالیز شیمیایی و نرم‌افزار ANSYS نشان داد که عواملی مانند اکسیداسیون، فرسایش، افزایش بیش از حد دما و خوردگی داغ از دلایل اصلی خرابی بوده‌اند [۹]. افزون بر این، اثر ناچ در ریشه پره کمپرسور توربین گاز با روش اجزای محدود بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شد؛ تحلیل مودال نشان داد که طول ناچ تأثیر قابل‌توجهی بر شکل مودهای پره دارد [۱۰].

۲ مدل سازی

پیچیدگی هندسی پره های توربین گاز، استفاده از روش های تحلیلی دقیق را در تحلیل های دینامیکی با دشواری مواجه می سازد. اگرچه روش های نظری برای هندسه های ساده شده از دقت قابل قبولی برخوردارند، اما در مواجهه با اشکال پیچیده و سه بعدی، قابلیت کاربرد خود را از دست می دهند. برای فائق آمدن بر این محدودیت، متداول است که از مدل های ساده سازی شده با حفظ ویژگی های کلیدی دینامیکی استفاده می شود. در بسیاری از موارد، حتی از هندسه های بنیادی تر مانند تیرهای معادل با شرایط مرزی مشابه بهره گرفته می شود. این رویکرد، امکان به کارگیری چارچوب های تحلیلی و نیمه تحلیلی را برای برآورد اولیه پارامترهای دینامیکی مهمی همچون فرکانس های طبیعی و شکل مدهای ارتعاشی فراهم می آورد.

تعیین این مشخصات دینامیکی از اهمیت بنیادینی برخوردار است، زیرا امکان پیش بینی الگوی ارتعاشات و توزیع تنش های القایی در حین کارکرد پره را مهیا ساخته و معیاری کلیدی برای ارزیابی کفایت مقاومت سازه در برابر بارهای رفتاری ارائه می دهد. مدل سه بعدی ساده هندسه پره توربین در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل سه بعدی پره

حاصل شده اند [۱۸]. در سال های اخیر، شبیه سازی عددی رشد ترک در پره های توربین و اجزای آیرودینامیکی مشابه به ابزاری مؤثر برای پیش بینی یکپارچگی ساختاری و برآورد عمر مفید تبدیل شده است.

وانگ نشان داد که اندرکنش هم زمان بارهای آیرودینامیکی، گریز از مرکز و بارگذاری ترکیبی تأثیر قابل توجهی بر مسیر و نرخ رشد ترک دارد [۱۹].

در حوزه نگهداری و تعمیرات، رویکرد نگهداری پیش بینانه شامل نگهداری مبتنی بر شرایط و مدیریت پیش آگهی و سلامت، به عنوان راهبردهایی نوین برای نظارت بر عملکرد تجهیزات توسعه یافته اند. بهره گیری از الگوریتم های هوشمند و روش های تشخیص مبتنی بر داده، امکان پیش بینی خرابی ها و بهینه سازی برنامه های نگهداری را فراهم کرده است [۲۰-۲۲]. در چارچوب انقلاب صنعتی چهارم، این تحولات دیجیتال با هدف افزایش دسترس پذیری، قابلیت اطمینان و سهولت نگهداری در سیستم های پیچیده ای مانند توربین های گازی مورد توجه قرار گرفته اند [۲۳، ۲۴].

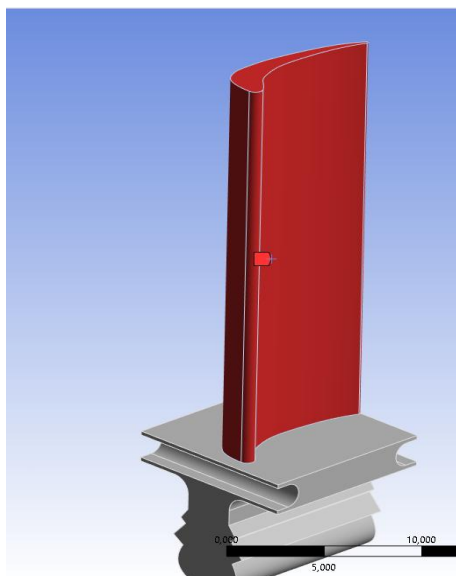
در زمینه بررسی پره های توربین گاز، آنالیز مودال عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS و با در نظر گرفتن خواص حرارتی و مکانیکی متغیر انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می دهد که آلیاژهای پایه نیکل، نظیر Nimonic، در شرایط عملیاتی واقعی دچار تغییرات قابل ملاحظه ای در رفتار دینامیکی می شوند [۲۵].

در این مقاله، یک تحلیل دو مرحله ای مبتنی بر روش اجزای محدود، شامل تحلیل ساختاری-حرارتی کوپل شده و تحلیل مودال، بر روی پره توربین گاز انجام شده است. ابتدا، مدل سه بعدی پره تحت بارگذاری ترکیبی ناشی از نیروهای گریز از مرکز و گرادیان حرارتی عملیاتی قرار گرفت تا نواحی با تمرکز تنش بالا (مناطق بحرانی) شناسایی شوند. در گام بعد، با اعمال یک ترک اولیه در بحرانی ترین ناحیه شناسایی شده، تحلیل های مودال به صورت پارامتریک و برای عمق های مختلف ترک انجام پذیرفت. خروجی اصلی این مرحله، استخراج مقادیر فرکانس های طبیعی و ارزیابی کمی میزان حساسیت آن ها به رشد آسیب است.

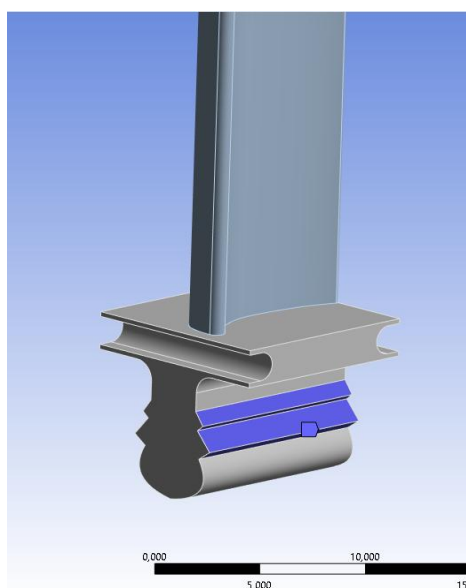
به دلیل شرایط ویژه دمایی و تعامل سازه و سیال در توربین، پره‌ها از فولاد آلیاژی ضد زنگ X20Cr13 ساخته می‌شوند. این آلیاژ کاربردهای زیادی در صنایع گوناگون از جمله موشک‌سازی، پره توربین و روتور سانتریفیوژ هسته‌ای دارد. در جدول ۱، خواص فیزیکی و مکانیک آن ارائه شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی آلیاژ

مدول الاستیسیته E	۲۰۵ GPa
ضریب پواسون ν	۰/۲۳۵
چگالی ρ	۷۷۰۰ kg/m ³
تنش تسلیم S_y	۶۹۰ MPa
تنش کششی نهایی S_{ut}	۸۵۰ MPa
ظرفیت گرمایی ویژه K	۴۶۰ J/kg.K



شکل ۲- شرایط مرزی دمایی

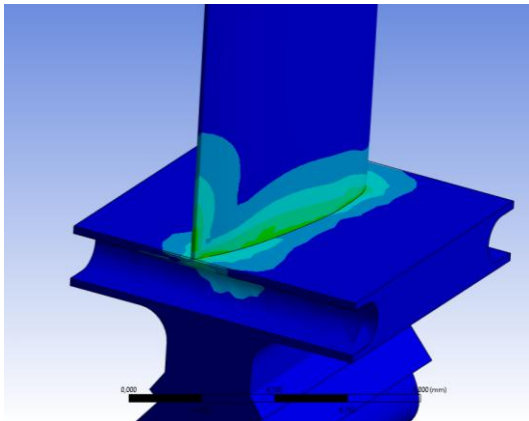


شکل ۳- ریشه مقید شده پره

شرایط مرزی و عملیاتی در این مطالعه بر اساس مشخصات عملکردی توربین گاز سیمنس مدل V94.2 با توان خروجی ۱۶۳ مگاوات تعریف شد که به‌طور گسترده در نیروگاه‌ها و صنایع نفت در هر دو سیکل ساده و ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای عملیاتی کلیدی شامل دمای هوای خروجی کمپرسور در ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت دورانی روتور برابر با ۳۰۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی در حالت بار کامل و شرایط پایدار انجام شده و فشار متوسط هوای اعمال‌شده بر سطح پره نیز ۱ مگاپاسکال فرض گردید [۶].

در راستای شبیه‌سازی واقع‌گرایانه، شرایط دمایی توزیع‌یافته بر روی پره مطابق شکل ۲ اعمال گردید. همچنین، شرایط اتصال پره به دیسک روتور (اصطکاک یا پینی) با اعمال قیدهای مناسب مدل‌سازی شد. مطابق شکل ۳، درجات آزادی انتقالی در محل اتصال کاملاً مهار شده‌اند تا از هرگونه جابجایی صلب جلوگیری شود و تنها درجه آزادی چرخش حول محور روتور مجاز در نظر گرفته شد. این شرایط مرزی، رفتار واقعی پره را در حین دوران شبیه‌سازی می‌کند.

با توجه به حساسیت تحلیل تنش در نواحی با تمرکز هندسی بالا مانند ریشه پره و پیشانی ترک، از المان‌های هرمی با مرتبه دوم



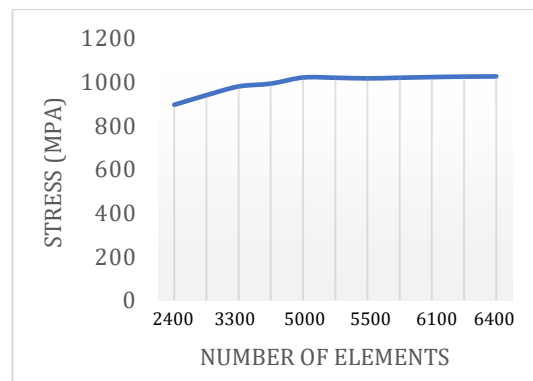
شکل ۵- کانتور تنش فون مایز (توزیع تنش) در پره بدون ترک

ایجاد ترک در سازه، به طور ذاتی منجر به کاهش سختی موضعی در ناحیه آسیب دیده می شود. از دیدگاه فیزیک ارتعاشات، فرکانس طبیعی یک سیستم تابعی مستقیم از نسبت سختی به جرم آن است. فرکانس طبیعی، هنگامی که یک ترک در پره ظاهر می شود، به خصوص در نواحی پرتنش مانند ریشه یا لبه های حمله و فرار، باعث کاهش موثر سطح مقطع و در نتیجه کاهش سختی کلی سازه می گردد. این کاهش سختی غالباً تأثیر قابل توجهی بر فرکانس طبیعی سیستم دارد. اگرچه جرم نیز ممکن است به طور جزئی کاهش یابد، اما کاهش سختی به مراتب اثر غالب را در تغییر فرکانس طبیعی دارد. بنابراین، با کاهش سختی کل پره، فرکانس های طبیعی آن کاهش می یابند. این پدیده به ویژه در مودهای ارتعاشی که در ناحیه ترک بیشترین خیز یا کرنش را تجربه می کنند، نمود بیشتری دارد [۲۲ و ۲۳].

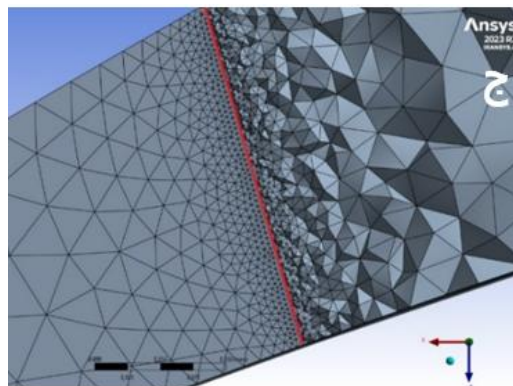
در تحلیل مکانیک شکست روش بلوک ترک بکار گرفته شده است. در این روش از المان های تکین و هرمی درجه دوم در نواحی اطراف و نوک ترک استفاده می شود. فرمول ۱ نشان دهنده میدان تنش در اطراف ترک برای مود اول است که در آن مؤلفه های تنش در مختصات قطبی نسبت به نوک ترک، r فاصله از نوک ترک، θ زاویه نسبت به امتداد ترک، K_I ضریب شدت تنش برای مود اول، $f_{ij}(\theta)$ توابع وابسته به زاویه است. در این فرمول $1/\sqrt{r}$ مشخص کننده رفتار تکین تنش نزدیک نوک ترک است.

برای شبکه بندی بدنه پره استفاده شده است. وجود گره های اضافی بر روی لبه ها و سطوح این المان، انعطاف لازم برای انطباق دقیق با هندسه را فراهم می آورد. علاوه بر این، توابع شکل درجه دوم این المان، امکان نمایش دقیق تر گرادیان تنش در نواحی بحرانی مانند محل اتصال پره به دیسک و به ویژه در نوک ترک را مهیا می سازد. این قابلیت، منجر به بازسازی واقع بینانه تری از پدیده تمرکز تنش می گردد. بر همین اساس، این المان به عنوان گزینه بهینه برای مدل سازی هندسه ترک و تحلیل میدان تنش اطراف آن در محیط نرم افزار ANSYS انتخاب و به کار گرفته شد [۲۵].

با انجام تحلیل تنش بر روی نمونه بدون ترک و بررسی کانتور تنش فون مایز، نواحی مستعد جوانه زنی و رشد ترک مشخص شده است. شکل ۴ نمودار استقلال از شبکه را نشان می دهد. همچنین در شکل ۵ کانتور فون مایز نمایش داده شده است. مشاهده می شود که از ۵۰۰۰ تا ۶۴۰۰ المان، پاسخ ثابت مانده و همگرا شده است، لذا در ادامه از ۵۰۰۰ المان استفاده خواهد شد. پژوهش انجام شده توسط پلزیسینگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۸] و همچنین پژوهشی های مشابه [۱۰ و ۷] دیگر نیز نتایج مشابهی را نشان می دهد.



شکل ۴- نمودار استقلال از شبکه



شکل ۶- (الف) محل قرارگیری ترک در زاویه فرار پره، (ب) نمای ترک لبه‌ای مدل شده در نرم‌افزار، (ج) نمای جبهه ترک و المان‌های جبهه ترک

وجود ارتعاشات محیطی و ناشی از بارگذاری عملیاتی در توربین گاز، می‌تواند به عنوان محرک اصلی برای جوانه‌زنی ترک در نواحی با تمرکز تنش بالا عمل کند. رشد تدریجی این ترک‌ها تحت مکانیزم خستگی ارتعاشی، در نهایت می‌تواند منجر به شکست ناگهانی پره و توقف پرهزینه واحد تولیدی گردد. بنابراین، پایش رفتار ارتعاشی و تشخیص به‌موقع آسیب، از اهمیت راهبردی در مدیریت قابلیت اطمینان این تجهیزات برخوردار است.

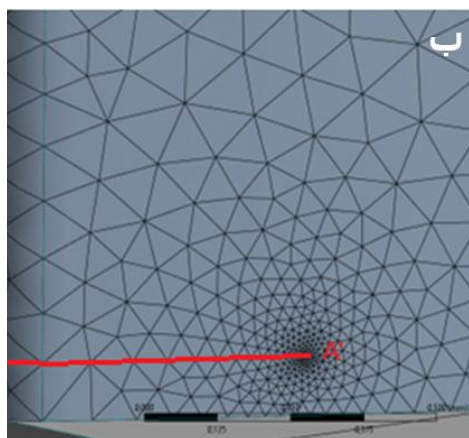
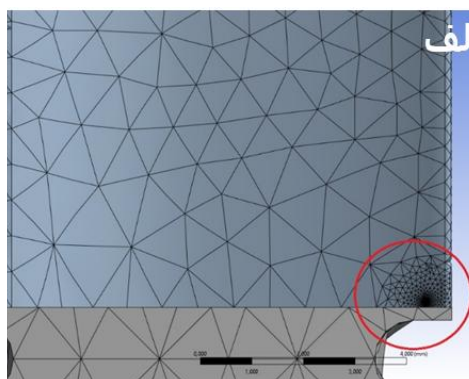
در این میان، فرکانس‌های طبیعی به عنوان یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای ذاتی سازه، هم در مرحله طراحی و هم در فرآیند پایش سلامت مورد توجه قرار می‌گیرند. سازندگان معمولاً این مقادیر را در مستندات فنی گزارش می‌کنند، چرا که هم‌پوشانی آنها با فرکانس‌های تحریک موجود در محیط عملیاتی می‌تواند پدیده رزونانس (تشدید) را ایجاد کند که با بزرگنمایی دامنه ارتعاش، تسریع قابل توجهی در روند تخریب به همراه دارد. آنالیز مودال روش پایه برای تعیین این فرکانس‌هاست. در این پژوهش، تغییرات فرکانس‌های طبیعی به عنوان شاخص حساس و غیرمخرب برای ارزیابی یکپارچگی ساختاری و پایش وضعیت پره در نظر گرفته شده است.

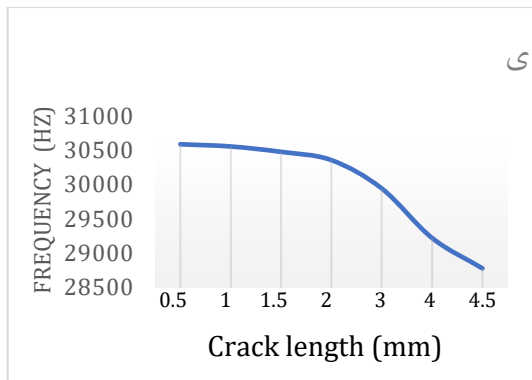
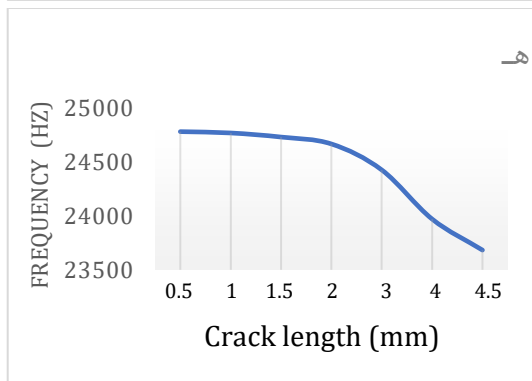
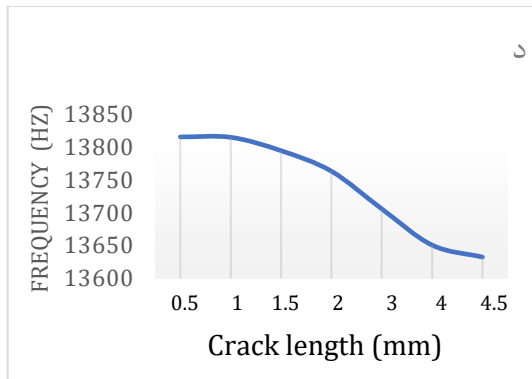
به این منظور، با استفاده از ماژول تحلیل مودال نرم‌افزار ANSYS، مقادیر فرکانس طبیعی برای چند مود اول ارتعاشی استخراج

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

از آنجا که المان‌های چهاروجهی استاندارد قادر به بازتولید رفتار $1/\sqrt{r}$ در اطراف و نوک ترک نیستند، المان‌های سینگولار جهت بازنمایی دقیق میدان تنش در اطراف نوک ترک به کار گرفته می‌شوند [۲۴].

شکل ۶ نمونه ترک مدل شده با استفاده از روش بلوک ترک را نشان می‌دهد. در شکل ۶- الف محل قرارگیری ترک، در شکل ۶- ب صفحه ترک با AA'، در شکل ۶- ج جبهه ترک و همچنین المان‌های جبهه ترک نمایش داده شده است.

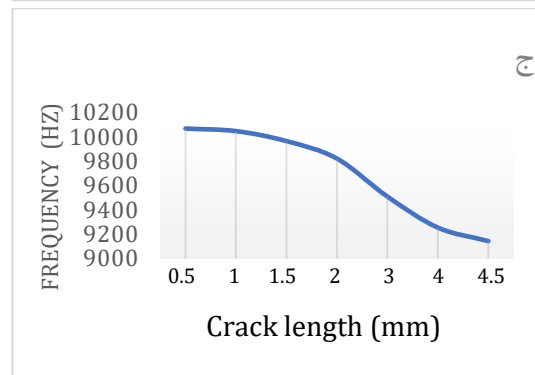
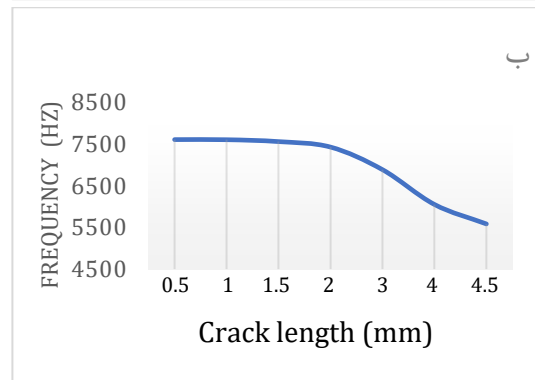
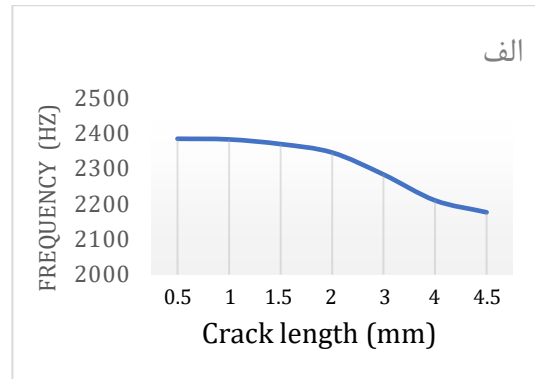


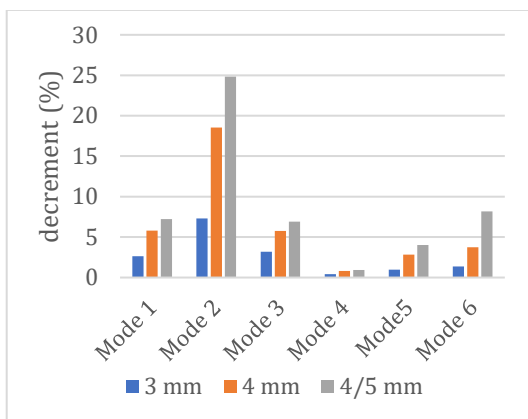


شکل ۷- تغییرات فرکانس طبیعی برحسب عمق ترک (الف) مود ۱، (ب) مود ۲، (ج) مود ۳، (د) مود ۴، (هـ) مود ۵، (ی) مود ۶

نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک که در نمودارهای ۷-الف تا ۷-ی ارائه شده‌اند، روند سیستماتیک و غیرخطی کاهش فرکانس‌های طبیعی را با افزایش عمق ترک آشکار می‌سازند. یک نقطه عطف رفتاری بحرانی در عمق ترک تقریبی ۲ میلی‌متر قابل شناسایی

گردد. این تحلیل به‌صورت پارامتریک و برای گستره‌ای از عمق ترک از ۰/۵ تا ۴/۵ میلی‌متر انجام شد. نتایج کمی این تحلیل که نمایانگر ارتباط سیستماتیک بین رشد ترک و جابجایی در طیف فرکانسی است، در شکل ۷ ارائه شده‌اند.





رسم توضیحی ۸- درصد افت فرکانسی مودها برای عمق ترک‌های ۳، ۴ و ۴/۵ میلی‌متر

در نتیجه، رصد مداوم فرکانس‌های طبیعی، به ویژه مودهای حساس‌تر مانند مود دوم، می‌تواند یک روش پایش سلامت قدرتمند را فراهم کند. تشخیص انحراف از روند خطی اولیه و رسیدن به «نقطه بحرانی» شناسایی شده در این تحلیل، می‌تواند به عنوان یک آستانه هشدار اولیه برای رشد سریع ترک و برنامه‌ریزی تعمیرات پیش‌گیرانه در بهره‌برداری از توربین‌های گاز مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد، امکان گذار از نگهداری واکنشی به یک استراتژی نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر داده را فراهم می‌سازد.

۳ نتیجه

این مطالعه با هدف توسعه یک ملاک عملی برای پایش سلامت پره‌های توربین گاز، یک چارچوب تحلیلی دو مرحله‌ای شامل تحلیل مکانیک شکست و تحلیل مودال را به روش اجزای محدود ارائه نمود. شبیه‌سازی با در نظرگیری شرایط عملیاتی واقعی (بارهای حرارتی، مکانیکی و خواص مواد) انجام شد تا نتایج با بیشترین انطباق ممکن با رفتار واقعی سازه حاصل آید. یافته‌های کلیدی این پژوهش به شرح زیر است:

۱. الگوی غیرخطی و وابسته به مود در کاهش فرکانس: نتایج تحلیل مودال پارامتریک، یک رابطه غیرخطی قوی بین عمق ترک

است. پیش از این آستانه، تغییرات فرکانس نسبت به رشد ترک تقریباً خطی و با شیب ملایم است که نشان‌دهنده تأثیر محدود ترک‌های کم عمق بر سفتی کل سازه می‌باشد. بر این اساس، می‌توان عمق ۲ میلی‌متر را به عنوان یک حد بحرانی تقریبی برای ترک در نظر گرفت. بدین معنی که ترک‌هایی با عمق کمتر از این مقدار، اگرچه ممکن است از نظر سازه‌ای وجود داشته باشند، اما تأثیر نامطلوب آن‌ها بر مشخصه‌های دینامیکی پره هنوز در محدوده قابل قبول و ایمن قرار دارد. با عبور از این آستانه، وابستگی فرکانس به عمق ترک به شدت غیرخطی شده و افت محسوس و فزاینده‌ای در مقادیر فرکانس تمامی مودها رخ می‌دهد. این تغییر رژیم، احتمالاً ناشی از رسیدن پیشانی ترک به نواحی با حساسیت تنش بالاتر و در نتیجه، کاهش مؤثر سفتی محلی سازه است. در مطالعه‌ای تجربی بر روی پره کمپرسور توربین گاز، شریفی و همکاران نیز نتیجه‌ای مشابه بدست آوردند [۶]. همچنین مطالعه عددی انجام شده توسط حیدری و همکاران نیز این نتایج را تایید می‌کند [۲۵].

کمی‌سازی این افت، همانگونه که در نمودار ۸ به صورت درصدی نشان داده شده است، بر شدت تغییرات پس از نقطه بحرانی تأکید دارد. مقایسه حساسیت مودهای مختلف، الگوی جالب‌توجهی را نشان می‌دهد: مود دوم ارتعاشی بیشترین حساسیت (بیشترین درصد کاهش فرکانس) را به رشد ترک از خود نشان می‌دهد، در حالی که مود چهارم کمترین حساسیت را داراست. این اختلاف را می‌توان به توزیع انرژی کرنشی و مودهای مختلف نسبت داد. مود دوم احتمالاً انرژی کرنشی بیشتری را در ناحیه ریشه پره (محل ترک) متمرکز می‌کند، بنابراین اختلال ایجادشده توسط ترک، تأثیر قوی‌تری بر فرکانس این مود دارد. این یافته از این جهت حیاتی است که نشان می‌دهد نه تنها وجود ترک، بلکه شکل مود تحریک‌شده نیز در میزان تأثیر آن بر پاسخ دینامیکی مؤثر است.

محیط‌های صنعتی واقعی را دارا باشند. این تحلیل، می‌تواند به عنوان یک آستانه هشدار اولیه برای رشد سریع ترک و برنامه‌ریزی تعمیرات پیش‌گیرانه در بهره‌برداری از توربین‌های گاز مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد، امکان گذار از نگهداری واکنشی به یک استراتژی نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر داده را فراهم می‌سازد.

منابع

- [1] [1] Vibration analysis and fatigue lifetime assessment, Journal of Vibration and Control or Advances in Mechanical Engineering (Sage Publications). DOI: 10.1177/16878132251347802. (Note: Full journal name and volume/issue not specified in provided metadata)
- [2] Evolution of modal parameters of composite wind turbine blades, Journal of Civil Structural Health Monitoring (Springer). DOI: 10.1007/s13349-024-00773-1. (Published 2024)
- [3] Nonlinear vibration characteristics and damage detection method, Journal of Sound and Vibration or Mechanical Systems and Signal Processing (ScienceDirect). DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963824008447>. (Note: Full journal name inferred from DOI prefix; article published 2024)
- [4] Wang Y, et al. Dual-Parameter Diagnosis of Gas Turbine Blade Fatigue Cracks Based on Blade Tip Timing Data. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2025;74: Article Sequence Number 3510212. DOI: 10.1109/TIM.2025.3543210. (Published 14 February 2025)
- [5] Pugno N, et al. A generalized Paris' law for fatigue crack growth. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 2006;54(7):1333-1349.
- [6] Witek L. Experimental crack propagation analysis of the compressor blades working in high cycle fatigue condition. Fatigue of Aircraft Structures 2009:195-204.
- [7] Poursaeidi E and Bakhtiari H. Fatigue crack growth simulation in a first stage of compressor blade. Engineering Failure Analysis 2014;45:314-325.

در ناحیه ریشه و کاهش فرکانس‌های طبیعی را آشکار ساخت. این کاهش پس از عبور از یک آستانه بحرانی در عمق تقریبی ۲ میلی‌متر، به‌طور فزاینده‌ای تشدید می‌شود. نکته حائز اهمیت، حساسیت متفاوت مودهای ارتعاشی به رشد ترک است؛ به‌طوری که مود دوم با ۲۵٪ بیشترین درصد کاهش فرکانس و مود چهارم با کمتر از ۱٪ کمترین حساسیت را از خود نشان دادند. این اختلاف را می‌توان مستقیماً به توزیع انرژی کرنشی و شکل مودهای مختلف مرتبط دانست، که بر نقش حیاتی انتخاب شاخص تشخیصی مناسب (فرکانس کدام مود) در سیستم‌های پایش سلامت تأکید می‌کند.

۲. تعیین یک شاخص تشخیصی کمی و آستانه هشدار: روند مشاهده‌شده افت فرکانس، امکان تعریف یک عمق بحرانی ترک را به عنوان یک شاخص کلیدی فراهم می‌آورد. عبور از این آستانه که با تغییر مشخص در شیب منحنی‌های فرکانس-عمق ترک همراه است، می‌تواند به عنوان یک هشدار اولیه در سیستم‌های پایش برخط مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد، امکان تشخیص زودهنگام رشد آسیب را قبل از رسیدن به مراحل خطرناک و غیرقابل برگشت فراهم می‌سازد.

۳. تأثیرات کاربردی در نگهداری پیش‌بینانه: نتایج این تحقیق، پایه‌ای محکم برای گذار از استراتژی‌های نگهداری دوره‌ای یا واکنشی به سمت نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر شرایط ارائه می‌دهد. با استقرار حسگرهای ارتعاشی مناسب و رصد مستمر فرکانس‌های طبیعی به ویژه مودهای حساس مانند مود دوم، می‌توان الگوی افت فرکانس را پایش و با کالیبره کردن آن با نتایج این شبیه‌سازی، عمر باقی‌مانده پره را با دقت بهتری تخمین زد. این امر به بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیرات، جلوگیری از توقف‌های ناخواسته و افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی عملیات توربین منجر خواهد شد.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که تلفیق تحلیل‌های دقیق عددی با درک عمیق از فیزیک مسئله، می‌تواند به توسعه شاخص‌های تشخیصی مؤثری بینجامد که قابلیت پیاده‌سازی در

- [18] Wang W, et al. Fatigue crack propagation simulation of airfoil section blades under aerodynamic, centrifugal, and combined loads. *Engineering Fracture Mechanics* 2023.
- [19] Liu H, et al. A numerical approach to simulate 3D crack propagation in turbine blades. *International Journal of Mechanical Sciences* 2020.
- [20] Kordestani M, Saif M, Orchard ME, Razavi-Far R and Khorasani K. Failure prognosis and applications — a survey of recent literature. *IEEE Transactions on Reliability* 2021;70(2):728–748.
- [21] Pech M, Vrchota J and Bednař J. Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory: review. *Sensors* 2021;21(4):1470.
- [22] Jasiulewicz-Kaczmarek M and Gola A. Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing — an overview. *IFAC-PapersOnLine* 2019;52(10):91–96.
- [23] Poor P, Ženišek D and Basl J. Historical overview of maintenance management strategies: development from breakdown maintenance to predictive maintenance in accordance with four industrial revolutions. *IFAC-PapersOnLine* 2019.
- [24] Method. *International Journal of Mechanical Sciences* 2016;108:152–160.
- [25] ANSYS Corporation, 2023. *ANSYS theory manual reference*. ANSYS Inc.
- [26] Rao, S. S. (2017). *Mechanical Vibrations*. 6th ed. Pearson.
- [27] Ewins, D. J. (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. 2nd ed. Research Studies Press Ltd.
- [28] Anderson, T.L., 2017. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 4th ed. CRC Press, Boca Raton, USA
- [29] Heidari, S., Zabiollah, A. and Behzad, M., 2017. Estimation of reliability and life assessment of gas turbine blades using modal analysis. *M.Sc. thesis, Sharif University of Technology*
- [8] Plesiutchnig E, et al. Fracture analysis of a low pressure steam turbine blade. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* 2016;5:39–50.
- [9] Rani S, et al. Failure investigations of a first stage Ni-based superalloy gas turbine blade. *Materials Today: Proceedings* 2018;5(1):477–486.
- [10] Sharifi SMH, et al. 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* 2022;22(4):1733–1743.
- [11] Qu Z, Zhang L, Yan L, Ni Z and Wu J. Experimental crack propagation and fracture failure analysis of the titanium alloy blade subjected to high cycle fatigue. *AIP Conference Proceedings* 2019;2154:020005.
- [12] Li YG and Nilkitsaranont P. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance. *Applied Energy* 2009;86(10):2152–2161.
- [13] Mehalaine A and Berkani O. Experimental study on vibration analysis of rotor-stator rub defect in a gas turbine generator set. *Journal of Failure Analysis and Prevention* 2023.
- [14] Xiong H, Peng Y, Hu Y, Zhang L and Li Y. Vibration fault signal analysis and diagnosis of flue gas turbine. *Engineering Failure Analysis* 2022;134:105981.
- [15] Abdelrhman AM, Hee LM, Leong M and Al-Obaidi S. Condition monitoring of blade in turbomachinery: a review. *Advances in Mechanical Engineering* 2014;6:210717.
- [16] Mottershead JE and Friswell M. Model updating in structural dynamics: a survey. *Journal of Sound and Vibration* 1993;167(2):347–375.
- [17] Mares C, et al. Stochastic model updating: Part 1 — theory and simulated example. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2006;20(7):1674–1695.