

Failure Analysis of Stator and Rotor Blades of a Gas Turbine: Case Study

Elham Rajabi^{lib*}, Kourosh Nematipour

Metallurgy Department, Turbine Machine Meaddle East Part Supplier Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: June 30, 2026
Revised: August 10, 2026
Accepted: August 11, 2026
ePublished: September 03, 2026

ABSTRACT

This study investigates the failure mechanisms of the third-stage stator blade and fourth-stage rotor blade of a gas turbine following 720 hours of operation. The initial fracture led to extensive damage to the remaining stationary and rotating blades. To determine the probable origin of the fracture, macroscopic examination, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) were employed. The presence of striations and beach marks indicated that the fracture of the third-stage stator blade was fatigue-related. EDS analysis confirmed the presence of approximately 55 at.% gold in the bright region of the fracture surface, indicating a previous repair using a gold-based brazing alloy. Examination of the fracture surface revealed a cavity approximately 100 μm in diameter and a crack at the interface between the base metal and the brazing alloy. These features were attributed to inadequate wetting and insufficient penetration of the filler metal during the brazing process. Such defects can act as stress concentration sites, providing favorable conditions for the initiation and subsequent growth of fatigue cracks. The available evidence also indicates that, following initiation, the fatigue crack propagated along the fracture surface and ultimately led to the fracture of the third-stage stator blade. Subsequently, the failure of the third-stage stator vane likely caused the detached fragments to strike the fourth-stage rotor blade, resulting in and contributing to its sudden failure.

Keywords: Fracture Surface, Gas Turbine Blade, Fatigue, Brazing, Foreign Object Damage.

How to cite this article

Rajabi E, Nematipour K, Failure Analysis of Stator and Rotor Blades of a Gas Turbine: Case Study. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(11):865-875.

*Corresponding author's email: Elham.Rajabi7171@gmail.com

*Corresponding ORCID ID: 0009-0003-8780-9485



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی علت شکست پره‌های ثابت و متحرک یک توربین گازی: مطالعه موردی

الهام رجبی*^{id}، کوروش نعمتی پور

دپارتمان متالورژی، شرکت تامین کالای توربین ماشین خاورمیانه، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش، علل تخریب پره ردیف سوم استاتور و پره ردیف چهارم روتور یک توربین گازی که پس از ۷۲۰ ساعت کارکرد، دچار شکست شده است مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی علت شکست، از بررسی‌های ماکروسکوپی، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز EDS استفاده شد. حضور استرایشن‌ها و خطوط ساحلی نشان داد شکست پره ردیف سوم استاتور از نوع خستگی می‌باشد. آنالیز EDS حضور حدود ۵۵ درصد اتمی طلا را در ناحیه روشن سطح شکست تایید کرد که بیانگر انجام تعمیر قبلی با آلیاژ بریز پایه طلا است. بررسی سطح شکست، وجود حفره و ترک‌هایی را در فصل مشترک فلز پایه و آلیاژ بریز را نشان داد که به دلیل ترشوندگی و نفوذ ناکافی فلز پرکننده در فرآیند بریز ایجاد شده‌اند. این نقاط به عنوان نواحی تمرکز تنش، می‌توانند زمینه را برای جوانه‌زنی و رشد ترک خستگی فراهم کنند. شواهد موجود همچنین نشان می‌دهد که ترک خستگی، در سطح شکست توسعه یافته و در نهایت به شکست پره ردیف سوم استاتور منجر شده است. در ادامه، شکست پره ردیف سوم استاتور احتمالاً سبب برخورد قطعات جدا شده با پره ردیف چهارم روتور شده و به شکست ناگهانی آن منجر شده است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

کلیدواژه‌ها: سطح شکست، پره توربین گازی، خستگی، بریزینگ، ضربه جسم خارجی.

نحوه ارجاع به این مقاله

رجبی الهام، نعمتی پور کوروش، بررسی علت شکست پره‌های ثابت و متحرک یک توربین گازی: مطالعه موردی، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۷۵-۱۷۰ (۱۱): ۲۶(۱۱): ۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Elham.Rajabi7171@gmail.com

*شناسه ارجید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0009-0003-8780-9485



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

توربین گاز موتور است که در تولید نیرو و سامانه‌های پیشرانش به کار گرفته می‌شود. یک توربین گاز معمولی شامل دو بخش اصلی است: بخش داغ (توربین) و بخش سرد (کمپرسور). کمپرسور نقش حیاتی در تأمین هوای مورد نیاز برای فرایند احتراق ایفا می‌کند [۱]. اگرچه کمپرسور بخش سرد توربین گاز محسوب می‌شود، اما اجزای آن، به‌ویژه پره‌ها، همچنان در معرض سازوکارهای مختلف آسیب مانند خستگی، خوردگی و آسیب ناشی از برخورد اجسام خارجی قرار دارند [۲،۳]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که اجزای کمپرسور عمدتاً به دلیل خستگی، سایش، سرج، استال و ارتعاشات شدید دچار شکست می‌شوند. شکست خستگی در پره‌های کمپرسور شامل مراحل شروع ترک، رشد ترک و شکست نهایی است که در اثر تمرکز تنش‌های چرخه‌ای پس از ایجاد ترک اولیه رخ می‌دهد [۴-۶].

این ترک اولیه می‌تواند ناشی از آسیب برخورد جسم خارجی، خوردگی، اصطکاک یا ناپیوستگی‌های هندسی مانند شیارها باشد. علاوه بر این، عوامل ریزساختاری مانند رسوبات، ناخالصی‌های غیرفلزی مانند اکسیدهای کروم یا سیلیس، آخال‌ها و ناهمگنی اندازه دانه نیز می‌توانند در ساختار ماده می‌تواند به عنوان محل شروع ترک عمل کند [۷-۸]. همچنین، برخورد ذرات خارجی باعث ایجاد حفره روی لبه حمله پره شده و با ایجاد تمرکز تنش دینامیکی، عمر خستگی را به شدت کاهش می‌دهد [۹].

در میان عوامل محیطی، یون‌های کلرید به‌ویژه مخرب هستند و معمولاً در اتمسفرهای ساحلی حضور دارند و در تشدید فرایندهای خوردگی نقش دارند. رطوبت محیط نیز می‌تواند بر نرخ خوردگی تأثیرگذار باشد. یکی از رایج‌ترین انواع خوردگی در چنین شرایطی، خوردگی حفره‌ای (پیتینگ) است که ممکن است بر سطوح پره‌های در معرض نمک‌های حاوی کلرید ایجاد شود [۱۰-۱۲]. بسیاری از پژوهشگران بیان کرده‌اند که ناپیوستگی هندسی ناشی از یک حفره باعث ایجاد گرایان تنش بزرگ و تمرکز تنش موضعی با مقدار بالا می‌شود [۱۳-۱۵].

تمرکز تنش، تمایل به شروع ترک را افزایش می‌دهد که این مرحله، بخش بحرانی در شکست خستگی است. پیش‌تر هم در پره‌های ساخته‌شده از فولاد زنگ‌زن AISI 410 و هم در پره‌های کمپرسور ساخته‌شده از فولاد زنگ‌زن C450 شکست خستگی ناشی از حفره خوردگی گزارش شده است. حد دوام خستگی در محیط‌های خورنده به‌طور قابل‌توجهی کمتر از شرایط غیرخورنده است، زیرا اثرات بارگذاری مکانیکی و حمله شیمیایی یا خوردگی به‌صورت هم‌زمان عمل می‌کنند. قابل توجه است که مرحله آغاز ترک (که معمولاً طولانی‌ترین بخش در فرایند شکست خستگی است) در محیط‌های خورنده به دلیل تشکیل حفره‌ها به‌شدت تسریع می‌شود [۱۲]. پره‌های توربین از حساس‌ترین قطعات در صنایع نیروگاهی هستند

که تحت شرایط عملیاتی بسیار سخت از جمله تنش‌های استاتیکی و دینامیکی قرار دارند [۱۶]. فولادهای زنگ‌زن مارتنزیتی با دارا بودن ۱۲ تا ۱۷ درصد کروم (درصدوزنی) و مقدار کافی کربن (۰/۱۵ تا ۱/۰ درصد وزنی)، به دلیل دارا بودن خواص مختلفی از جمله: مقاومت به خوردگی بالا، خواص الکتریکی و ماشین‌کاری مناسب، مقرون به صرفه بودن، کاربرد زیادی در بخش پره توربین‌های گازی دارد [۱۷-۲۱].

معمولاً جهت گرفتن لقی بین پره و رینگ، اتصال به روش بریزینگ استفاده می‌شود بریزینگ روشی برای ایجاد اتصالات فلزی مستحکم، یکنواخت و بدون نشتی است که در مقایسه با سایر روش‌های اتصال، سریع‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر انجام می‌شود. این روش امکان اتصال فلزات غیرهمجنس را با استفاده از فلز پرکننده با نقطه ذوب پایین فراهم می‌کند که معمولاً از آلیاژی بر پایه نقره، مس، طلا، نیکل، پالادیم، منگنز یا کبالت تشکیل شده است. استحکام اتصال به عوامل مختلفی مانند اندازه فاصله اتصال، میزان تمیزی سطوح، نوع فلز پرکننده، دمای فرایند، اتمسفر و میزان ترشوندگی فلز پرکننده بستگی دارد [۲۲]. طبق مطالعات انجام شده، آماده‌سازی نامناسب سطح و عدم رعایت فواصل بهینه در فرایند بریزینگ منجر به نفوذ ناقص ماده پرکننده و ایجاد لایه‌های اکسیدی ضعیف در فصل مشترک می‌شود این عیوب نه تنها باعث کاهش چسبندگی می‌شوند، بلکه به عنوان یک شکاف عمل کرده و تمرکز تنش را در محل اتصال به شدت افزایش می‌دهند که در نهایت منجر به شروع ترک‌های خستگی عرضی می‌گردد [۲۳]. در این پژوهش، تحلیل شکست یک پره ردیف سوم استاتور و ردیف چهارم ارائه شده است. هدف از این بررسی، مشخص کردن ترتیب شکست پره استاتور و روتور تحلیل علل احتمالی شکست پره‌ها در حین سرویس می‌باشد.

۲- مشاهدات

یک توربین گازی با توان ۴/۵ مگاوات پس از حدود ۷۲۰ ساعت کارکرد، به دنبال شنیده شدن صدای غیرعادی و ثبت خطای T5 (افزایش غیرعادی دمای خروجی توربین) از مدار خارج شد. در بررسی اولیه مشخص گردید که روتور کمپرسور در هنگام چرخش دستی با پره‌های استاتور تماس دارد که نشان‌دهنده وجود آسیب در بخش داغ توربین است.

پس از دمونتاژ توربین، مشخص شد چهار پره ثابت ردیف سوم به سمت ورودی کمپرسور خم شده و در نتیجه با پره‌های متحرک ردیف سوم توربین تماس یافته‌اند. همچنین، یک پره ثابت ردیف سوم در موقعیتی معادل ۱۰٪ ارتفاع پره (Span)، از سمت ریشه، دچار شکست شده بود. بر روی سطح شکست این پره، آثار آلودگی‌ها و رسوبات سطحی با منشا نامشخص مشاهده شد. علاوه بر این، پره‌های متحرک ردیف چهارم نیز به سمت ورودی کمپرسور خم شده

بودند و یکی از آن‌ها نیز در فاصله‌ای حدود ۱۰٪ ارتفاع پره (Span)، دچار شکست شده بود. همچنین، آلودگی در ناحیه خروجی نازل تمامی انژکتورها مشاهده شد. آثار تغییر رنگ نیز بر روی صفحات داخلی و خارجی لاینر محفظه احتراق مشاهده گردید که بیانگر قرارگیری این نواحی در معرض شرایط دمایی غیرعادی است. شکل ۱ نمایشی از سطح شکست پره، پره‌های خم شده ردیف سوم استاتور و پره‌های آسیب‌دیده ردیف چهارم روتور را نشان می‌دهد. به منظور تعیین مکانیسم شکست و شناسایی علت ریشه‌ای حادثه، بررسی‌های شکست‌شناسی بر روی سطوح شکست هر دو پره انجام شد.

۳- مواد و روش انجام آزمایش

در این پژوهش، بررسی بر روی پره ردیف سوم استاتور و ردیف چهارم روتور یک توربین گازی ۴/۵ مگاواتی انجام شد. این پره پس از حدود ۳۰ روز کارکرد که تحت سرویس بوده است دچار تخریب شده و منجر به خاموش شدن توربین جهت تعمیرات اساسی شده است. جنس پره استاتور، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 پره روتور AISI 630 می‌باشد. اطلاعاتی از جنس ماده بریز استفاده شده در پره استاتور در دسترس نبود.

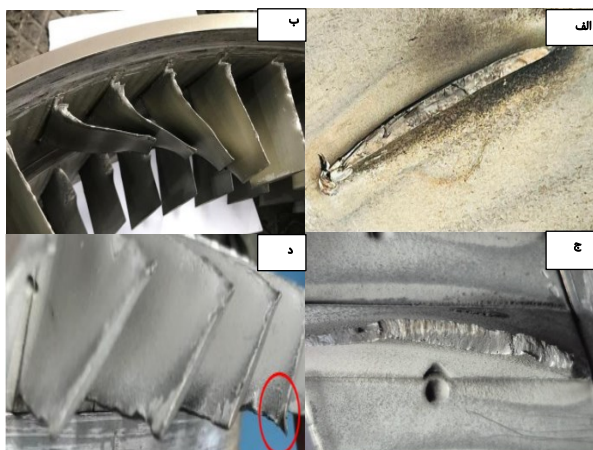
در این پژوهش از دستگاه Foundry Master (WAS) جهت آنالیز کوانتومتری برای تشخیص آلیاژ مورد نظر استفاده شد. جهت بررسی خواص مکانیکی پره و مقایسه با استانداردها، آزمون سختی سنجی توسط دستگاه Innovatest Nova 240 انجام شد. در این آزمون از فرورونده الماس هرمی شکل استفاده شد.

جهت بررسی‌های ریزساختاری به منظور تحلیل ریزساختاری پره‌ها از میکروسکوپ نوری Optika B-600MET استفاده شد. هم چنین جهت بررسی سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)، به مدل MIRA3 محصول شرکت TESCAN مجهز به آنالیز EDS استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ سطح شکست پره و جدول نتایج آنالیز EDS ردیف سوم استاتور را نشان می‌دهد. نواحی تیره رنگ روی سطح شکست، آلودگی‌های سطحی هستند که با چشم غیر مسلح نیز قابل مشاهده هستند و در بخش مشاهدات نیز به آن پرداخته شد. جهت بررسی آلودگی‌های سطح، آنالیز EDS از سطح شکست گرفته شد. با توجه به شکل ۲، حضور عناصر S, Ca, K, Na نشان می‌دهد که سطح شکست در معرض محصولات ناشی از احتراق و سوخت قرار گرفته است. هم چنین در سطح شکست مقداری عنصر طلا مشاهده شد. جهت بررسی‌های بیشتر سطح شکست و تعیین علت شکست پره استاتور و روتور، سطح شکست با استون به روش اولتراسونیک تمیز شد. شکل ۳ تصویر کلی از سطح شکست پره استاتور را نشان می‌دهد. در شکل ۳-ب ترک در گوشه سطح شکست کاملاً مشخص

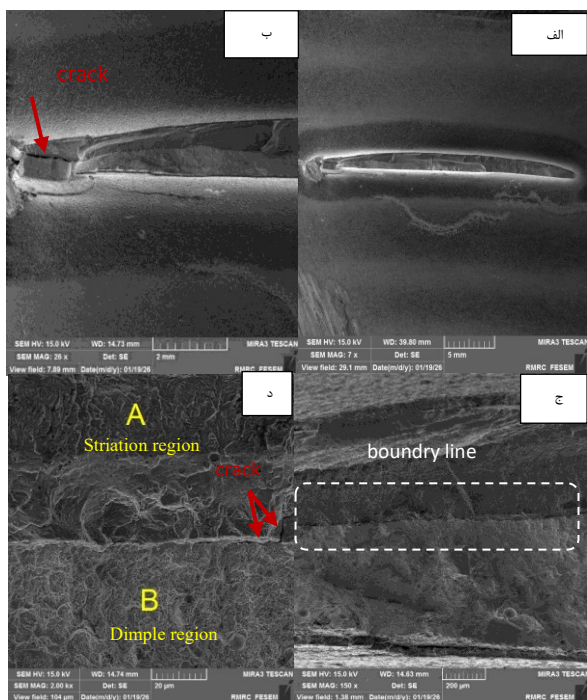
می‌باشد. هم چنین در شکل ۳-د نیز در محدوده بین ناحیه A و B نیز ترکی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۳-ج و ۳-د، مرزی در سطح شکست مشاهده می‌شود که سطح شکست را به دو قسمت، تقسیم می‌کند (در شکل ۳-ج با خط چین سفید نشان داده شده است).



شکل ۱. مشاهدات ماکروسکوپی از پره‌های آسیب‌دیده پس از دیمونتاژ توربین شامل: (الف) سطح شکست پره ردیف سوم استاتور، (ب) پره‌های خم شده ردیف سوم استاتور در مجاورت پره شکسته شده، (ج) سطح شکست پره ردیف چهارم روتور، و (د) پره‌های خم شده ردیف چهارم روتور در مجاورت پره شکسته شده.

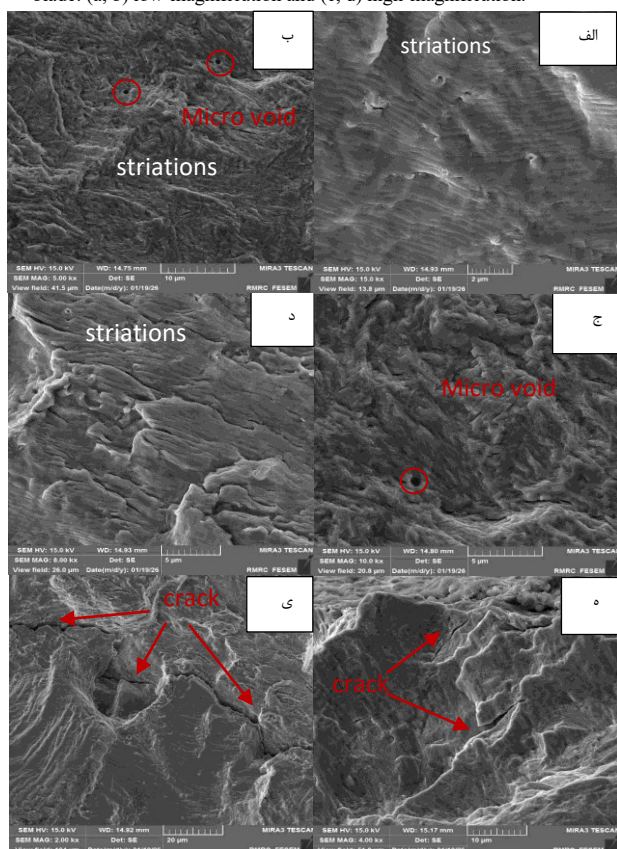
Figure 1. Macroscopic observations of the damaged blades after turbine disassembly, including: (a) fracture surface of the third-stage stator blade, (b) bent third-stage stator vanes adjacent to the fractured blade, (c) fracture surface of the fourth-stage rotor blade, and (d) bent fourth-stage rotor blades adjacent to the fractured blade.

در بزرگنمایی‌های بالاتر، در دو طرف این خط مرزی در سطح شکست پره ردیف سوم استاتور، مورفولوژی‌های متفاوتی مشاهده می‌شود (شکل ۳-د). ناحیه A شامل الگوی استرایشن بوده، در حالی که ناحیه B دارای ساختارهای دیمپل است. ناحیه A که در بخش مربوط به پیشروی ترک قرار دارد و دارای الگوی استرایشن بوده، نشان‌دهنده رشد تدریجی ترک تحت بارگذاری خستگی است. در ادامه مسیر رشد ترک، ناحیه B به عنوان بخش نهایی سطح شکست مشاهده می‌شود که با مورفولوژی دیمپل مشخص شده و بیانگر شکست نرم ناشی از اضافه بار پس از کاهش سطح مقطع تحمل‌کننده بار است. این دو ناحیه در شکل ۳-د مشخص شده‌اند. مشاهده استرایشن‌ها در ناحیه A نشان‌دهنده رشد تدریجی ترک تحت بارگذاری‌های سیکلی می‌باشد. این الگوها به صورت خطوط موازی و متوالی در مسیر پیشروی ترک مشاهده می‌شوند و بیانگر مرحله انتشار ترک خستگی هستند. همچنین، ترک مشاهده شده در مجاورت مرز بین نواحی A و B، نشان‌دهنده اتصال ناحیه رشد ترک خستگی با ناحیه شکست نهایی می‌باشد. شکل ۴، استرایشن‌ها، ترک‌ها و میکروویدهای موجود در سطح شکست را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. علاوه بر استرایشن‌ها،



شکل ۳) تصویر FE-SEM الف و ب) سطح شکست پره استاتور با بزرگنمایی پایین تر ج و د) سطح شکست پره استاتور با بزرگنمایی بالاتر

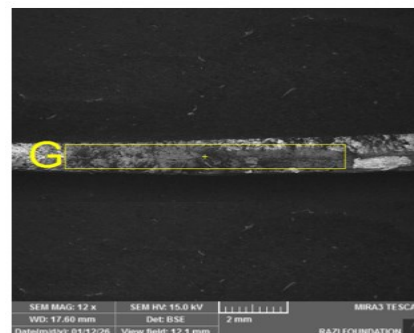
Figure 3. FE-SEM images of the fracture surface of the third-stage stator blade: (a, b) low-magnification and (c, d) high-magnification.



شکل ۴) تصویر FE-SEM سطح شکست پره استاتور با بزرگنمایی های مختلف در نواحی A (بالای خط مرزی)

Figure 4. FE-SEM images of the fracture surface of the stator blade in region A at different magnifications (above the boundary line)

حضور میکروویدها در سطح شکست بیانگر وجود ناپیوستگی های موضعی در فرآیند شکست می باشد که می توانند در مسیر رشد ترک یا مرحله شکست نهایی نقش داشته باشند. شکل ۵ نیز مورفولوژی دیمپل های مشاهده شده در ناحیه B را نشان می دهد وجود استرایشن در ناحیه A با رشد تدریجی ترک تحت بارگذاری خستگی سازگار است، در حالی که وجود دیمپل در ناحیه B نشان دهنده شکست نرم و تغییر شکل پلاستیک موضعی پیش از شکست است. بنابراین، ناحیه A به عنوان ناحیه رشد ترک خستگی و ناحیه B به عنوان ناحیه محتمل شکست نهایی تفسیر می شود. شکل ۶ سطح شکست پره ردیف چهارم روتور را در بزرگنمایی های مختلف نشان می دهد. این ناحیه دارای مورفولوژی شکست ناشی از جدایش ناگهانی بوده و فاقد شواهدی از رشد تدریجی ترک می باشد. در بزرگنمایی های بالاتر، دیمپل ها در سطح شکست مشاهده شدند، در حالی که اثری از استرایشن ها مشاهده نشد. عدم مشاهده استرایشن ها در کنار حضور دیمپل ها و ناحیه کندی در سطح شکست، نشان می دهد که پره روتور فاقد شواهدی از رشد تدریجی ترک خستگی بوده و مورفولوژی شکست با شکست نرم ناشی از اضافه بار سازگار است. در سطح شکست روتور، یک ناحیه کندی مشاهده شد (شکل های ۶ الف و ۶ ب). با توجه به مورفولوژی این ناحیه، احتمال وقوع برخورد و اعمال بار موضعی مطرح است. با این حال، بر اساس شواهد فرکتوگرافی، تعیین محل دقیق آغاز شکست امکان پذیر نیست.



El%	W%	A%	El%	W%	A%
C	24.07	47.73	Cl	0.26	0.18
O	17.22	25.64	K	1.07	0.65
Na	0.93	0.97	Ca	0.80	0.47
Mg	0.32	0.31	Cr	6.09	2.79
Al	1.34	1.18	Fe	28.68	12.23
Si	0.95	0.80	Ni	6.27	2.54
P	0.31	0.24	Zn	0.31	0.11
S	4.44	3.30	Au	6.93	0.84

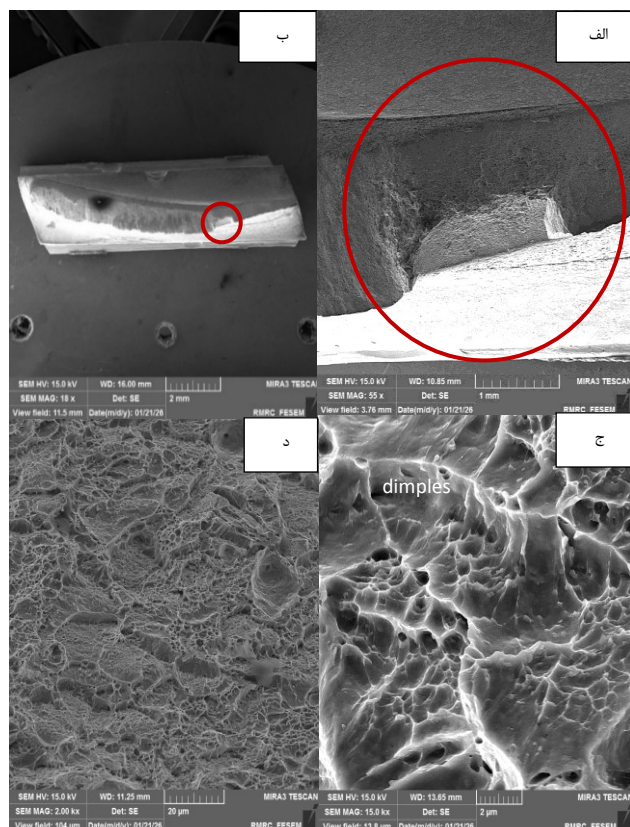
شکل ۲) نتایج آنالیز EDS ناحیه G سطح شکست پره از ردیف سوم متحرک استاتور

Figure 2. EDS analysis results of region G on the fracture surface of the third-stage stator blade.

جدول ۲ محدوده تغییرات درصد عناصر AISI 410 براساس استاندارد ASTM A276.

Table 2. Chemical composition ranges of AISI 410 in accordance with ASTM A276.

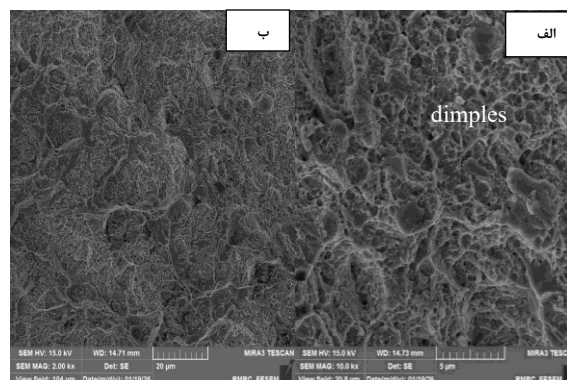
Fe	Si	Mn	P
Base	Max 1.00	Max 1.50	Max 0.04
S	Cr	C	Ni
Max 0.03	11.5-13.5	0.08-0.15	Max 0.75



شکل ۶ (تصویر FE-SEM الف و ب) سطح شکست پره روتور با بزرگنمایی پایین‌تر ج و د) سطح شکست پره روتور با بزرگنمایی بالاتر

Figure 6. FE-SEM images of the fracture surface of rotor blade: (a, b) low-magnification and (c, d) high-magnification.

شکل ۸ نتایج آنالیز EDS ناحیه B مشخص شده در شکل (۶-د) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، حدوداً ۵۵ درصد اتمی در نقطه مشخص شده طلا مشاهده شد. هم چنین در حد فاصل طلا و فولاد نیز ترک مشاهده شد (در شکل علامت گذاری شده است). شکل ۹ نیز تصویر FE-SEM سطح شکست پره استاتور را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ در قسمتی از ناحیه B (شکل ۹ الف و ب)، تعدادی حفرات توخالی کروی مشاهده شد.



شکل ۵ تصویر FE-SEM سطح شکست پره استاتور با بزرگنمایی‌های مختلف در نواحی B (پایین خط مرزی)

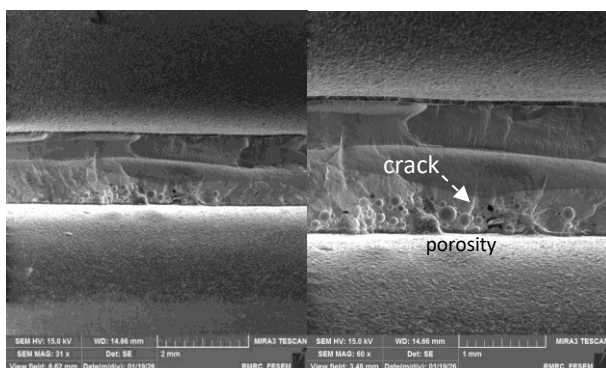
Figure 5. FE-SEM images of the fracture surface of the stator blade in region B at different magnifications (below the boundary line)

به نظر می‌رسد که ابتدا پره ردیف سوم استاتور دچار شکست شده و در ادامه پره ردیف چهارم روتور شکسته شده است بنابراین در ادامه به بررسی‌های خواص فیزیکی و مکانیکی پره استاتور پرداخته شد. جدول ۱ نتیجه آنالیز کوانتومتری یک پره سالم ردیف سوم استاتور و جدول ۲ محدوده تغییرات درصد عناصر مختلف فولاد AISI 410 را براساس استاندارد ASTM A276 را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود جنس پره، فولاد AISI 410 می‌باشد. هم چنین آزمون میکرو سختی از سطح مقطع این پره گرفته شد. میکرو سختی میانگین، عدد ۲۶۳ ویکرز محاسبه شد. سختی اندازه‌گیری شده و درصد عناصر در محدوده مورد انتظار و استاندارد می‌باشد. شکل ۷ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع یک پره سالم ردیف سوم استاتور را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، همانطور که انتظار می‌رود، ساختار نمونه از مارتنزیت تمپر شده تشکیل شده است. نشانه‌ای از حضور آخال مشاهده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علت شکست پره استاتور ناشی از فرایند تولید و عملیات حرارتی آن نمی‌باشد. هم چنین در حین سرویس ریز ساختار و خواص پره سالم تحت تاثیر شرایط (دمای بالا و محیط خورنده) قرار نگرفته است.

جدول ۱ نتایج آنالیز کوانتومتری یک پره سالم ردیف سوم استاتور.

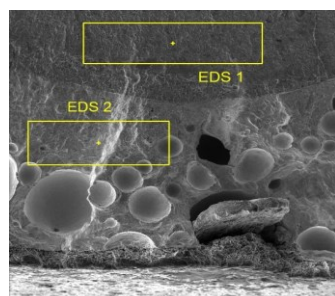
Table 1. Quantometric analysis results of a sound third-stage stator blade.

Fe	Si	Mn	P
Base	0.32	0.41	0.014
S	Cr	Mo	Ni
0.018	12.0	0.12	0.30
C	Al	Co	Cu
0.12	0.006	0.02	0.07
Nb	Ti	V	W
0.021	0.018	0.02	0.06



شکل ۹) تصویر FE-SEM سطح شکست پره استاتور با بزرگنمایی‌های مختلف

Figure 9. FE-SEM images of the fracture surface of the stator blade at different magnifications.

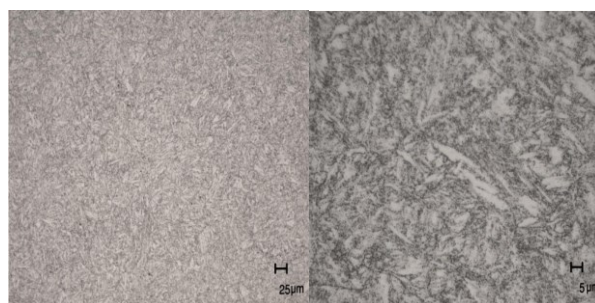


Point 1			Point 2		
Elt	W%	A%	Elt	W%	A%
Al	0.00	0.00	Cr	0.89	2.32
Si	0.13	0.25	Fe	5.15	12.50
Cr	12.68	13.48	Ni	12.67	29.26
Mn	0.28	0.28	Au	81.28	55.92
Fe	86.92	86.00			

شکل ۱۰) نتایج آنالیز EDS، بالا و پایین خط مرز مانند

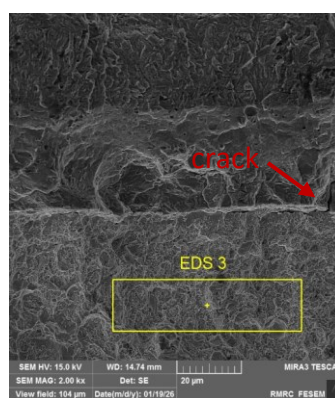
Figure 10. EDS analysis results of the regions above and below the boundary-like feature.

شکل ۱۲، حضور طلا نواحی روشن در تصویر میکروسکوپ الکترونی برگشتی سطح شکست نشان می‌دهد. طلا در ناحیه حضور حفرات و هم چنین در گوشه سمت راست پره در تصویر BSE با رنگ روشن‌تر دیده می‌شود. هم چنین یک حفره با قطری حدود ۱۰۰ میکرون و ترکی که از بین این حفره عبور کرده، در حد فاصل بین طلا و فولاد دیده می‌شود. این گونه حفرات سبب تمرکز تنش شده و معمولاً بعنوان محل مستعد برای شروع ترک شناخته می‌شود.



شکل ۷) تصویر OM از سطح مقطع از یک پره سالم دریف سوم استاتور

Figure 7. OM image of the cross-section of a sound third-stage stator blade.

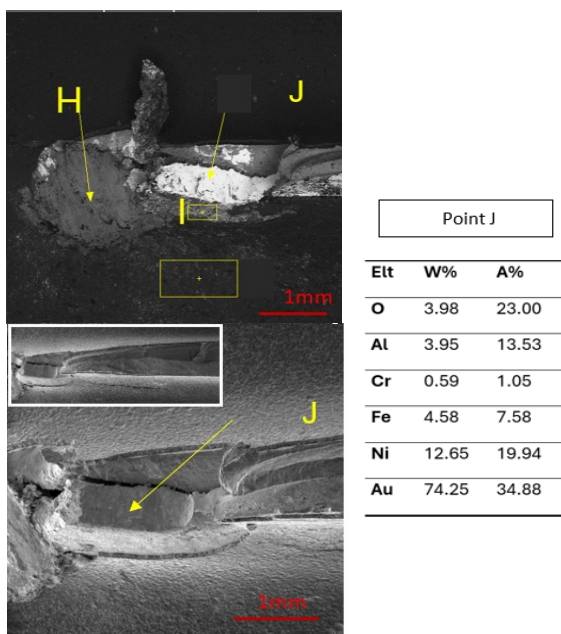


Elt	W%	A%
Cr	0.75	1.94
Fe	4.61	11.08
Ni	14.08	32.15
Au	80.55	54.83

شکل ۸) نتایج آنالیز EDS، ناحیه B مشخص شده در شکل (۳-د)

Figure 8. EDS analysis results of region B indicated in Figure 3(d).

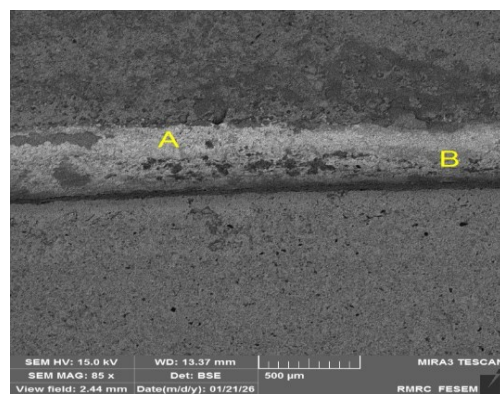
قطر برخی از این حفره‌ها نزدیک به ۲۰۰ میکرون می‌باشد. شکل ۱۰ نتایج آنالیز EDS را در بالا و پایین خط مرزی نشان می‌دهد. نتیجه آنالیز از نزدیکترین بخش به این حفرات نیز، حضور بخش زیادی طلا را نشان می‌دهد (شکل ۱۰). این درحالیست که آنالیز EDS در ناحیه B (بالتر خط مرز مانند) طلا دیتکت نشد. جهت مشخص شدن جنس ماده بریز، آنالیز EDS، در محل بریز پره و رینگ، انجام شد. شکل ۱۱ نتایج آنالیز EDS، محل بریز پره و رینگ (پشت رینگ) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۲، پایه اصلی ماده بریز نقره و پالادیم می‌باشد.



شکل ۱۳) نتیجه آنالیز EDS نقطه J قبل از اولتراسونیک

Figure 13. EDS analysis results of point J before ultrasonic cleaning.

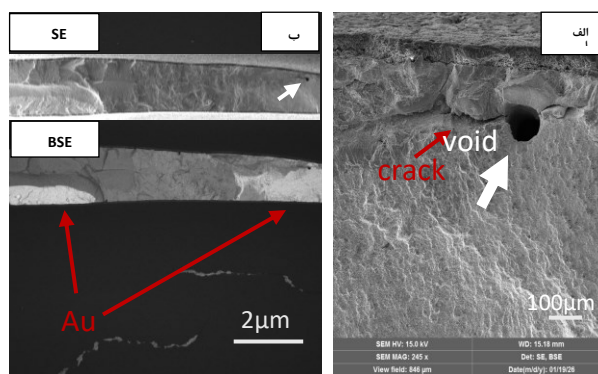
به نظر می‌رسد که برای گرفتن لقی بین پره و رینگ (در سطح رویی رینگ) نیز از بریز استفاده شده اما با توجه به حضور پوشش، امکان آنالیز EDS ماده بریز در سطح رینگ، وجود نداشت. با توجه به اینکه جنس ماده بریز در پشت رینگ از پایه نقره بود، اما در سطح شکست پره، طلا دیتکت شد، برای اطمینان یا رد شدن از فرضیه نفوذ عناصر ماده بریز در سطح شکست، یک پره سالم در ردیف سوم استاتور انتخاب شد و در نزدیکی سطح رینگ برش داده شد. سطح برش داده مورد بررسی و آنالیز EDS قرار گرفت. شکل ۱۴ نتیجه آنالیز EDS سطح برش داده را نشان می‌دهد. حضور مقادیری از عناصر نقره و پالادیم در زیر پوشش نشان دهنده نفوذ عناصر از ماده بریز می‌باشد. نواحی سفید رنگ (E)، خاکستری و مشکی به ترتیب، نشان دهنده حضور نقره، عناصر فلز پایه و آلودگی‌ها می‌باشد. از طرفی شکل ۱۵ که line-EDS از سطح پوشش بسمت مرکز سطح برش داده را نشان می‌دهد، حاکی از پدیده نفوذ عناصر نقره و پالادیم می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، عناصر نقره و پالادیم از مرز پوشش به بعد (نقطه ۲)، کاهش پیدا می‌کند این درحالیست که عناصر ماده پایه (مانند آهن) افزایش پیدا می‌کند. درواقع حضور این عناصر نشان داده ماده ای که جهت بریز برای گرفتن لقی بین پره و رینگ استفاده شده نیز از پایه نقره می‌باشد. بنابراین حضور طلا مرتبط به بریز رینگ و پره نمی‌باشد. بر اساس مشاهدات، به نظر می‌رسد، پره استاتور قبلاً دچار آسیب یا ترک شده و سپس با استفاده از بریز رینگ مبتنی بر طلا تعمیر شده است. این شواهد نشان می‌دهند که تعمیر بریز از نظر متالورژیکی دارای



Point A			Point B		
Elt	W%	A%	Elt	W%	A%
O	17.25	49.63	O	17.25	49.63
Fe	2.46	4.15	Cr	0.42	0.37
Cu	16.53	24.55	Fe	4.19	3.46
Pd	36.07	31.99	Cu	44.05	31.92
Ag	44.94	39.31	Pd	11.94	5.17
			Ag	22.15	9.45

شکل ۱۱) نتایج آنالیز EDS، محل بریز پره و رینگ

Figure 11. EDS analysis results of the blade braze joint region and the ring.

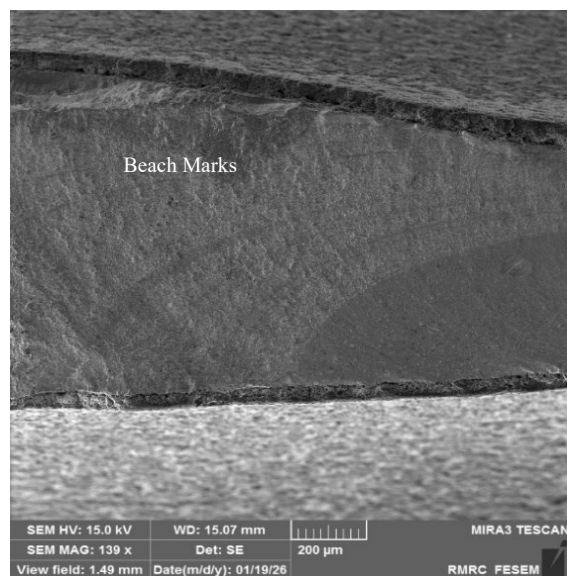


شکل ۱۲) الف) حضور حفره ب) حضور طلا در سطح شکست پره استاتور

figure 12. (a) Presence of a void; (b) Presence of Au on the fracture surface of the stator blade.

نتیجه آنالیز EDS (شکل ۱۳) حضور ۳۵ درصد اتمی طلا را در نقطه J قبل از اولتراسونیک نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است یک شکاف (ترک) بین ناحیه روشن (طلا) و فولاد در گوشه چپ پره مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۶ نیز در گوشه سمت راست پره، نشانه‌های از حضور خطوط ساحلی که نشان دهنده خستگی می‌باشد، مشاهده می‌شود.

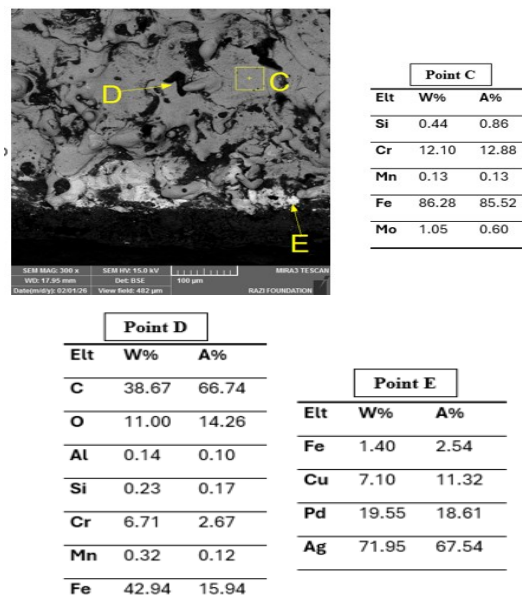


شکل ۱۶) حضور خطوط ساحلی در سطح شکست پره ردیف سوم استاتور

Figure 16. Beach marks on the fracture surface of the third-stage stator blade.

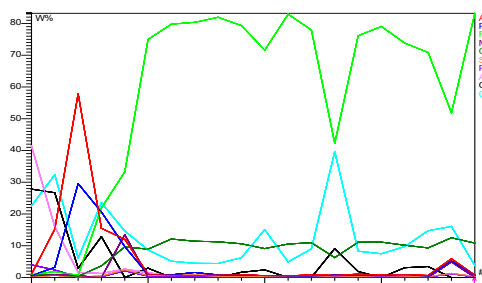
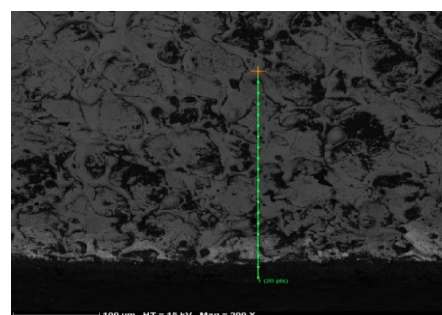
خستگی فرآیندی است که در آن ترک تحت تنش‌های تناوبی (حتی کمتر از استحکام تسلیم) جوانه زده و رشد می‌کند. این فرآیند شامل سه مرحله است: در نقاط تمرکز تنش مانند حفرات یا ناپیوستگی‌های متالورژیکی رخ می‌دهد جوانه زنی ترک اتفاق می‌افتد. سپس پیشروی ترک اتفاق می‌افتد که نشانه‌های آن خطوط میکروسکوپی استرایشن و ماکروسکوپی خطوط ساحلی است. زمانی که سطح مقطع باقی‌مانده توان تحمل بار را نداشته و دچار شکست سریع می‌شود. بر اساس مشاهدات سطح شکست، وجود ناحیه با بریز پایه طلا در سطح شکست نشان می‌دهد که این بخش پیش‌تر تحت عملیات تعمیر قرار گرفته است. این تعمیر از نظر متالورژیکی کیفیت مناسبی نداشته، زیرا در ناحیه اتصال فلز پایه (فولاد زنگ‌زن ۴۱۰) و فلز پرکننده طلا، عدم اتصال کامل، وجود حفره‌های گازی کروی متعدد و یک حفره بزرگ و ترک در مرز اتصال مشاهده شده است. این حفرات معمولاً بدلیل عدم تغذیه صحیح مذاب، عدم تر شوندگی فیلر، پارامترهای حرارتی نامناسب، ضخامت بیش از حد لایه بریز و یا بدلیل تبخیر آلودگی‌ها و محبوس شدن گازهای آن، شکل می‌گیرند. این نواحی ذاتاً تمرکز تنش بسیار بالایی ایجاد می‌کنند. وجود حفرات، نواحی عدم اتصال و ترک در فصل مشترک بین فلز پایه و آلیاژ بریز پایه طلا نشان‌دهنده اتصال ناقص در این ناحیه بوده و این ناپیوستگی‌ها می‌توانند به‌عنوان

ناپیوستگی‌هایی بوده و می‌توانسته در ایجاد شرایط مستعد برای آغاز ترک خستگی مؤثر باشد.



شکل ۱۴) نتیجه آنالیز EDS نقاط مختلف سطح برش داده شده یک پره سالم از ردیف سوم استاتور

Figure 14. EDS analysis results obtained from different locations on the cut surface of a sound third-stage stator blade.



شکل ۱۵) نتیجه آنالیز Line-EDS سطح برش داده شده یک پره سالم از ردیف سوم استاتور

Figure 15. Line-EDS analysis results of the cut surface of a sound third-stage stator blade.

نقاط تمرکز تنش عمل کنند. اگرچه تعیین دقیق نقطه جوانه‌زنی ترک بر اساس شواهد موجود امکان‌پذیر نیست، اما مجموعه شواهد متالورژیکی و فرکتوگرافی نشان می‌دهد که فصل مشترک بریز و فلز پایه می‌تواند یکی از محتمل‌ترین نواحی مستعد برای آغاز رشد ترک خستگی باشد. پس از جوانه‌زنی در یکی از نواحی مستعد تمرکز تنش، ترک تحت بارگذاری سیکلی در فلز پایه رشد تدریجی یافته است. شواهد این مرحله شامل مشاهده استریشن‌ها در ناحیه فولادی و خطوط ساحلی (در گوشه سمت راست) می‌باشد. این خطوط ساحلی مسیر و تاریخچه رشد ترک را نشان می‌دهند این ناحیه بیشتر ناحیه رشد اولیه قابل مشاهده ترک است، نه محل شروع ترک با ادامه رشد ترک و رسیدن طول آن به مقدار بحرانی، بخش باقیمانده مقطع دیگر قادر به تحمل تنش نبوده و شکست نهایی به صورت اضافه بار رخ داده است. این شکست نهایی عمدتاً در ناحیه غنی از طلا (ناحیه B) اتفاق افتاده و به صورت دیمپل‌ها که مشخصه شکست نرم می‌باشد، ظاهر شده است. بنظر می‌رسد قطعه جدا شده از استاتور پس از شکست، با پره روتور برخورد کرده و موجب شکست روتور به صورت شکست نرم ناشی از ضربه شده است. آلودگی‌های مشاهده شده شامل سدیم، سولفور، کلسیم، فسفر و رسوبات سیاه‌رنگ، اگرچه می‌توانند نشان‌دهنده شرایط احتراقی یا محیطی نامطلوب باشند، اما با توجه به عدم مشاهده پیتینگ یا خستگی خوردگی، عامل ریشه‌ای شکست محسوب نمی‌شوند و نقش آن‌ها در حد عامل تشدید کننده محیطی بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، علت شکست پره ردیف سوم استاتور و پره ردیف چهارم روتور بررسی شد. بررسی‌های میکروسکوپی سطح شکست نشان داد که شکست پره ردیف سوم استاتور ماهیت خستگی داشته است. حضور طلا در سطح شکست نیز نشان داد که پره پیش‌تر تحت عملیات تعمیراتی با آلیاژ بریز پایه طلا قرار گرفته است. در سطح شکست، حضور آلیاژ بریز پایه طلا و همچنین حفرات، ترک و نواحی عدم اتصال کامل در فصل مشترک بریز و فلز پایه مشاهده شد. شکست نهایی به صورت شکست نرم و با تشکیل دیمپل در بخش‌های نزدیک به حفرات در سطح شکست رخ داده است.

در ادامه، احتمالاً قطعه جدا شده از پره استاتور با پره روتور برخورد کرده و موجب شکست ثانویه پره روتور شده است. با توجه به مناسب بودن ترکیب شیمیایی و ریزساختار فلز پایه پره استاتور و نبود شواهد موثر از خوردگی در سطح شکست، ناپیوستگی‌های مشاهده شده در ناحیه بریزینگ، به عنوان یکی از محتمل‌ترین عوامل موثر و مرتبط با شکست ارزیابی شدند. مجموعه شواهد متالورژیکی و فرکتوگرافی نشان می‌دهد که این ناپیوستگی‌ها احتمالاً در آغاز و گسترش ترک خستگی و در نهایت شکست پره استاتور نقش مهمی داشته‌اند با این حال امکان تعیین دقیق محل جوانه‌زنی ترک بر اساس شواهد موجود، وجود نداشت.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع مالی: این پژوهش هیچ گونه گرنت مشخصی از آژانس‌های تأمین مالی در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

هوش مصنوعی مولد: در فرآیند آماده‌سازی این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی مولد استفاده نشده است.

منابع

- [1] Alqallaf, J., Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2020). Solid particle erosion behaviour and protective coatings for gas turbine compressor blades—A review. *Processes*, 8(8), 984. doi:10.3390/pr8080984.
- [2] Shi, L., Guo, S., Yu, P., Zhang, X., & Xiong, J. (2023). A review on leading-edge erosion morphology and performance degradation of aero-engine fan and compressor blades. *Energies*, 16(7), 3068. doi:10.3390/en16073068.
- [3] Kappis, W., & Guidati, G. (2012, June). Detailed compressor degradation effect modeling for single blade rows while assessing its local and overall consequences. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 44724, pp. 73-82). American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/GT2012-68475.
- [4] Salehinasab, B., & Poursaeidi, E. (2020). Mechanism and modeling of fatigue crack initiation and propagation in the directionally solidified CM186 LC blade of a gas turbine engine. *Engineering Fracture Mechanics*, 225, 106842. doi:10.1016/j.engfractmech.2019.106842.
- [5] Guo, J. (2024). Unsteady body force model for rotating stall in axial compressor with various inlet

Failure Analysis, 110277. doi:10.1016/j.engfailanal.2025.110277.

[18] Barlow, L. D., & Du Toit, M. (2012). Effect of austenitizing heat treatment on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420. *Journal of materials engineering and performance*, 21(7), 1327-1336. doi:10.1007/s11665-011-0043-9.

[19] Pickering, F. B. (1979). The metallurgical evolution of stainless steels: a discriminative selection of outstanding articles and papers from the scientific literature.

[20] Ezechidelu, J. C., Enibe, S. O., Obikwelu, D. O., Nnamchi, P. S., & Obayi, C. S. (2016). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a welded AISI 410 martensitic stainless steel. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 3(4), 6-12. doi: 10.17148/IARJSET.2016.3402.

[21] Khiabani A, Nasri M, Shajari Y, Seyedraoufi Z S. Effect of Compressive Residual Stress on Wear Resistance of IGT25 + Gas Turbine Compressor Blades Made of 1.4923 steel. *Modares Mechanical Engineering*. doi : 2022;22(03):167-177.

[22] Schwartz, M. M. (1993). Fundamentals of brazing.

[23] Poblano-Salas, C. A., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sanchez-Jimenez, J. C. (2011). Failure analysis of an AISI 410 stainless steel airfoil in a steam turbine. *Engineering Failure Analysis*, 18(1), 68-74. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.08.006.

conditions. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 62(1), 31-45. doi:10.15632/jtam-pl/174960.

[6] Poursaeidi, E., Sigaroodi, M. J., & Aieneravaie, M. (2024). Failure investigation of fatigue crack initiation and propagation in compressor blade. *Engineering Failure Analysis*, 162, 108370. doi:10.1016/j.engfailanal.2024.108370.

[7] Carter, T. J. (2005). Common failures in gas turbine blades. *Engineering Failure Analysis*, 12(2), 237-247. doi:10.1016/j.engfailanal.2004.07.004.

[8] Maktouf, W., & Sai, K. (2015). An investigation of premature fatigue failures of gas turbine blade. *Engineering Failure Analysis*, 47, 89-101. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.09.015.

[9] Mortazavi, S. Rahi, A. Jafari, S. (2024). Investigation of the Vibrational Behavior and Fatigue Failure of a Gas Turbine Blade under Damage Caused by Foreign Object Impact. *Tabriz University Journal of Mechanical Engineering* [in Persian]. doi:10.22034/jmeut.2024.61224.3400.

[10] Haskell, R. W. (1989). Gas turbine compressor operating environment and material evaluation (Vol. 79177, p. V005T11A002). *American Society of Mechanical Engineers*. doi:10.1115/89-GT-42.

[11] Corvo, F., Minotas, J., Delgado, J., & Arroyave, C. (2005). Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. *Corrosion science*, 47(4), 883-892. doi:10.1016/j.corsci.2004.06.003.

[12] Poursaeidi, E., & Arablu, M. (2013). Humidity effects on corrosion-assisted fatigue fracture of heavy-duty gas turbine compressor blades. *Journal of Propulsion and Power*, 29(5), 1009-1016. doi:10.2514/1.B34481.

[13] Cerit, M. (2013). Numerical investigation on torsional stress concentration factor at the semi elliptical corrosion pit. *Corrosion Science*, 67, 225-232. doi:10.1016/j.corsci.2012.10.028.

[14] Turnbull, A., Wright, L., & Crocker, L. (2010). New insight into the pit-to-crack transition from finite element analysis of the stress and strain distribution around a corrosion pit. *Corrosion science*, 52(4), 1492-1498. doi:10.1016/j.corsci.2009.12.004.

[15] Mollapour Y, Poursaeidi E. Investigation of Stress Distribution in Corrosion Pits on the Compressor Blade Using Boundary Element Method, *Modares Mechanical Engineering*. doi : 2021;21(9):601-613.

[16] Bloch, H. P., & Singh, M. P. (2009). *Steam turbines: design, applications, and rerating*. McGraw-Hill Education.

[17] Mostafavi, H., & Moghanaki, S. K. (2025). Environmentally-assisted fatigue in compressor blades of a power plant gas turbine. *Engineering*