نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 123-117

آنالیز متالورژیکی شکست خستگی در پره توربین بخار لحیم سخت شده

محمود سمیع زاده *، مجید واثقی ، حسین ظفری

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۸ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۰)

چکیده

در این مقاله علت شکست پره ردیف ۱۷ یک توربین بخار ۸۲/۵ مگاواتی که سبب آسیب هایی به محفظه داخلی توربین و تجهیزات مجاور پره نیز شده، مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تعیین علت شکست و جلوگیری از حوادث مشابه، بررسی های مختلف متالورژیکی و مکانیکی شامل آنالیز ترکیب شیمیایی، متالوگرافی و بررسی ریز ساختاری، شکست نگاری به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی و سختی سنجی و آزمون کشش روی آن انجام گرفت. نتایج اولیه نشان داد که آلیاژ به‌کاررفته دارای مشخصات ترکیب شیمیایی، ریزساختاری و خواص مکانیکی در محدوده قابل قبول می باشد و شکست پره بر اثر افت خواص متالورژیکی و مکانیکی حین سرویس صورت نگرفته است. نتایج حاصل از شکست نگاری، خستگی دور بالا را مکانیزم اصلی شکست پره معرفی می کند و نشان می‌دهد که ترک خستگی از ناحیه مجاور سوراخ مربوط به سیم مستهلک کننده ارتعاشات و از محل لحیم‌کاری سخت سیم به پره، به علت کیفیت نامناسب و اتصال ناقص لحیم سخت و تمرکز تنش ناشی از سوراخ، جوانه‌زده است که درنهایت با رشد و رسیدن به‌اندازه بحرانی، شکست ناگهانی پره رخ داده است.

کلمات کلیدی: پره توربین بخار، آنالیز تخریب، خستگی، لحیم کاری سخت.

Metallurgical Fatigue Failure Analysis of the Brazed Steam Turbine Blade

M. Sameezadeh, M. Vaseghi, H. Zafari

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

(Received 10 October 2018 ; Accepted 10 May 2019)

Abstract

In this paper, failure mechanism of a 17th stage blade of an 82.5 MW steam turbine that caused damage to the internal turbine compartment and the adjacent blade equipment has been studied. In order to determine the cause of failure and prevent similar events, various metallurgical and mechanical investigations including chemical composition analysis, metallography and microstructural analysis, fractography using scanning electron microscope and hardness and tensile tests were carried out. The initial results showed that the alloy had a chemical composition, microstructure and mechanical properties in the acceptable range, and the fracture failure was not due to the mechanical and metallurgical

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: m_sameezadeh@sbu.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

degradation during the service. The results of the fractography indicate high cycle fatigue as the main mechanism of the failure and shows that the fatigue crack has initiated from the adjacent hole relative to the vibration damped wire near to the brazing region on the blade, due to inadequate quality and incomplete connection of the brazing and its stress concentration effect the hole, which eventually has propagated and reached a critical level, and a sudden failure of the blade has occurred.

Keywords: Steam Turbine Blade; Failure Analysis; Fatigue; Brazing.

1- مقدمه

توربین بخار یکی از مهمترین تجهیزات دوار در صنعت به شمار می‌رود که در صنایع نفت و نیروگاهی از اهمیت بالایی برخوردار است. این نوع توربین، انرژی حرارتی را از بخار با فشار و دمای بالا می‌گیرد و از آن برای انجام کار مکانیکی به وسیله یک محور چرخشی استفاده می‌کند. نوع مدرن توربین بخار در سال ۱۸۸۴ میلادی توسط سر چالرز پارسوتر اختراع شده است [۱]. پره‌های توربین بخار از قطعات مهم توربین محسوب می‌شوند که حرکت خطی بخار با دما و فشار بالا را تبدیل به حرکت چرخشی محور توربین می‌نمایند. چنانچه یکی از این پره‌ها دچار شکست شوند، علاوه بر اینکه به سایر تجهیزات مجاور آسیب جدی وارد خواهد شد، سبب از کار افتادگی کل واحد نیز می‌گردد که این مساله تبعات زیاد اقتصادی و گاهی اوقات جانی برای نیروگاه و پرسنل به دنبال خواهد داشت. بنابراین انجام آنالیز شکست پره آسیب دیده و تعیین علت شکست آن به منظور پیشگیری از تکرار وقایع مشابه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم توربین امری ضروری است [۲]. در توربین بخار، ابتدا بخار وارد بخش پرفشار (HP) توربین، سپس به بخش فشار متوسط (IP) و در نهایت وارد منطقه کم فشار (LP) می‌شود. پره‌های توربین کم فشار برای استحصال انرژی باقیمانده بخار عبوری طراحی شده و دارای ایرفویل نسبتا بزرگی می‌باشند. بر اساس تحقیقات اخیر، پره‌های توربین LP معمولاً نسبت به پره های توربین HP و IP به شکست مستعدتر هستند [۳]. عوامل و مکانیزم‌های مختلفی در شکست پره ردیف‌های کم فشار توربین بخار تاثیرگذار بوده و گزارش شده اند که خستگی [۴]، خوردگی خستگی [۵] و سایش [۶] از متداول ترین آنها می‌باشند. در این مقاله به بررسی علت شکست پره ردیف ۱۷ یک توربین بخار ۸۲/۵ مگاواتی کشور پرداخته می‌شود .

2-مواد و روش تحقیق

یکی از پره‌هایی که در فاصله‌ی ۲۴ سانتی متری ریشه و از قسمت سوراخ مربوط به سیم مستهلک کننده، دچار شکست شده، برای بررسی علت شکست دریافت گردید. ابتدا سطح شکست به دو روش ماکروسکوپی با استفاده از دوربین تصویر برداری وضوح بالا و میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Vega-Tescan مجهز به آنالیزگرEDX مورد بررسی قرار گرفت و رسوبات روی سطح شکست نیز شناسایی شدند. در ادامه ترکیب شیمیایی پره به روش اسپکتروسکوپی نشر نوری (کوانتومتری) تعیین گردید. در مرحلهٔ بعد، از ایرفویل و ریشه پره نمونه‌هایی تهیه شد و بعد از آماده سازی، ریز ساختار آن‌ها توسط میکروسکوپ نوری نوع Olympus بررسی گردید.

در آخر برای بررسی خواص مکانیکی، با استفاده از دستگاهMicromet-1 آزمون سختی سنجی میکروویکرز از قسمت‌های ریشه و ایرفویل (نزدیک سطح شکست) انجام گرفت. در ادامه نتایج بررسی های صورت گرفته ارائه گردیده و مورد بحث قرار گرفته است.

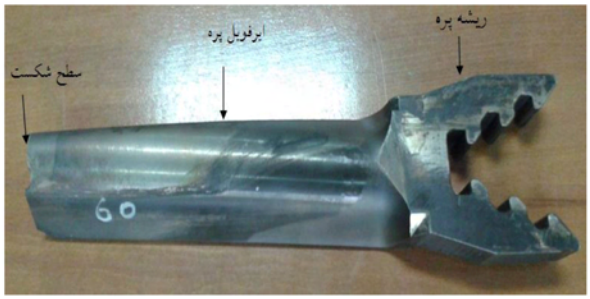
3-نتایج و بحث

3-1- بازرسی چشمی

شکل(۱) تصویر پره شکسته شده را نشان می‌دهد. پره مورد نظر در ناحیه سوراخ مربوط به عبور سیم مستهلک کننده به طور کامل شکسته و به دو قسمت تقسیم شده است. بعد از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

بازرسی چشمی پره و سطح شکست آن، مشخص شد که ترک از سمت محدب و کناره‌های سوراخ مربوط به عبور سیم مستهلک کننده شروع شده و به سمت مقعر پره گسترش یافته است. همچنین وجود آثار فرآیند لحیم کاری سخت در مجاورت سطح شکست قابل رویت است که در بررسی های شکست نگاری بصورت بیشتر بررسی شده است.



شکل ۱- پره شکسته شده

3-2-آنالیز شیمیایی

برای تعیین ترکیب شیمیایی پره مورد نظر از آزمون کوانتومتری استفاده گردید. نتایج آنالیز انجام شده در جدول(۱) ارائه شده است. مقایسه تطبیقی نتایج آنالیز با ترکیب شیمیایی آلیاژهای فولاد نشان می‌دهد که جنس پره از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی نوع AISI 410 می باشد. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی نوع AISI 410 نیز برای مقایسه در جدول مذکور آورده شده است.

3-3- سختی سنجی

سختی پره شکسته شده در ناحیه ریشه ایرفویل و نزدیک سطح شکست، اندازه گیری شده است و میانگین سختی بدست آمده برای قسمت ریشه پره برابر ۳۰۰ ویکرز و برای ناحیه ایرفویل نزدیک سطح شکست برابر ۲۹۷ ویکرز می باشد که نزدیک به هم می باشد. با مقایسه سختی های اندازه گیری شده با حالت استاندارد فولاد AISI 410 می توان بیان کرد که سختی پره مورد نظر در نواحی مختلف در محدوده استاندارد جنس پره بوده است و همچنین نزدیکی عدد سختی ریشه پره (مرجع) و ایرفویل نشان می‌دهد که سختی پره در حین کارکرد تغییر نکرده است.

3-4-آزمون کشش

آزمون کشش تک محوری بر روی سه نمونه کشش انجام گرفته که بر اساس آن به طور متوسط پره دارای استحکام تسلیم MPa ۷۴۷، استحکام کشش نهایی MPa ۹۵۳ و درصد ازدیاد طول ۲۲٪ بوده است. با توجه به منابع علمی، نتایج بدست آمده از آزمون کشش پره، در محدوده قابل قبول فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 قرار دارد[۷].

بنابراین با در نظر گرفتن نتایج آزمون‌های سختی سنجی و کشش و مقایسه آن با خواص مکانیکی فولاد استاندارد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI 410 که به عنوان جنس استفاده شده بوده است، می‌توان بیان کرد که پره در حین کار دچار افت خواص استحکامی نشده، به عبارتی شکست پره ناشی از زوال تدریجی خواص مکانیکی نبوده است.

3-5-بررسی ریزساختار

جهت بررسی ریزساختار و تغییرات آن در پره آسیب دیده، نمونه‌هایی از نواحی ریشه و نزدیک منطقه شکست تهیه شدند که پس از آماده سازی مورد بررسی متالوگرافی قرار گرفتند. شکل های(۲-الف و ۲-ب) به ترتیب ریزساختار ناحیه نزدیک سطح شکست و ریزساختار ریشه پره را نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌گردد ریزساختار از فاز زمینه مارتنزیت تمپر شده تشکیل شده است. با مقایسه ریزساختار مناطق نزدیک سطح شکست (شکل ۲-الف) و ریشه پره (شکل ۲-ب) می‌توان اظهار داشت که تغییرات ریزساختاری قابل ملاحظه‌ای در منطقه نزدیک سطح شکست نسبت به حالت ریزساختار اولیه پره اتفاق نیافتاده است. به عبارتی شکست پره ناشی از زوال ریزساختاری نیز نبوده است.

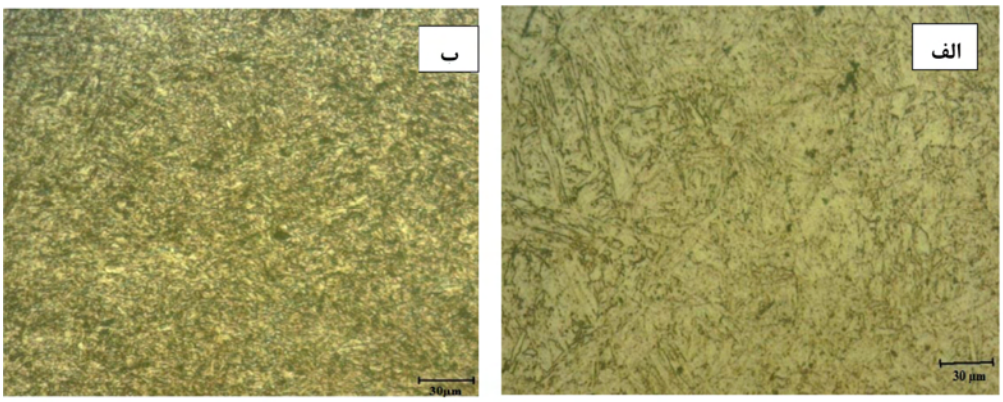
3-6- شکست نگاری

به منظور بررسی سطح شکست، ایرفویل پره از قسمتی پایین‌تر از سطح شکست بریده شده و مقطع به دست آمده با استفاده از روش آلتراسونیک تمیزکاری شده است. شکل(۳) تصویر سطح شکست با بزرگنمایی پایین را نشان می‌دهد. در قسمت هـای وسیعـی از سطـح شکست، خطوط منظم و نسبتاً

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی پره و مقایسه با آلیاژ استاندارد AISI 410 (بر حسب درصد وزنی) [۷].

	C	Mn	Si	Cr	S	P	Fe
Blade	0.1	0.48	0.27	12.1	0.01	0.0125	Base
AISI 410	0.15 max	1 max	1 max	11.5 - 13.5	0.03 max	0.04 max	Base



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ایرفویل پره نزدیک سطح شکست (الف) و ریشه پره (ب).

موازی ماکروسکوپی دیده می‌شود که با خط چین در شکل مشخص شده است.نکته حائز اهمیت در ارتباط با این خطوط این است که بصورت تناوبی و پشت سر هم تکرار شده‌اند که شباهت بسیار زیادی به خطوط ساحلی در سطح شکست خستگی دارند .

خطوط ساحلی ناشی از رشد تدریجی ترک و در اثر بارگذاری‌های تناوبی ایجاد می‌شوند. با توجه به نحوه عملکرد و چرخش پره توربین و گذر سیال از سطح آن، می توان اذعان کرد که پره تحت تنش تناوبی قرار داشته و ترک به وجود آمده در آن می‌توانسته بصورت تدریجی رشد کرده و این خطوط را به وجود آورده باشد. به عبارتی فلش‌های زردرنگ می‌توانند معرف مسیرهای رشد تدریجی ترک باشند. همچنین خطوط روی سطح شکست منحنی وار هستند و انحنای آن‌ها دارای نظم و در یک جهت خاص می‌باشد. بر اساس اصول شکست نگاری، دو فلش مسیر رشد ترک را مشخص کرده اند و خطوط منحنی به سمت مرکز ابتدای ترک و محل جوانه زنی آن اشاره می نماید(شکل ۳).

در یک شکست خستگی، می‌توان سه ناحیه متمایز را در نظر گرفت. ناحیه اول که به ناحیه جوانه‌زنی ترک خستگی موسوم است، شروع و آغاز ترک اتفاق افتاده و غالباً منطقه بسیار کوچک و حتی میکروسکوپی را در بر خواهد گرفت. این جوانه‌زنی ترک با توجه به مزیت استعداد ذاتی سطح از لحاظ سطح تنش، عوامل تمرکز تنش و غیره، در اکثریت قریب به اتفاق موارد از سطح اتفاق می‌افتد.



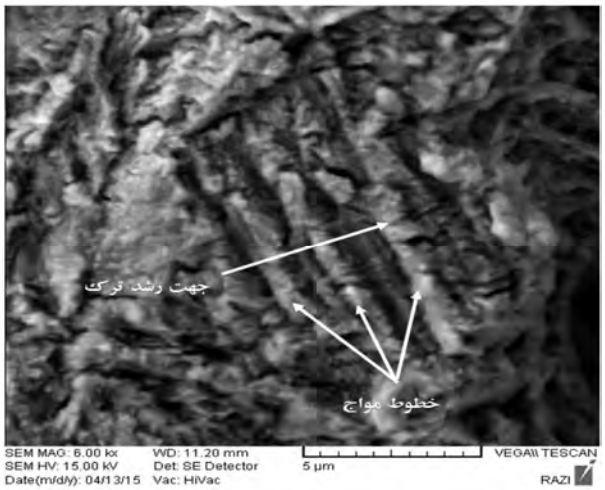
شکل ۳- تصویر ماکروسکوپی سطح شکست و وجود سه ناحیه جوانه زنی ترک، رشد ترک و شکست نهایی.

منطقه دوم، ناحیه رشد ترک خستگی می‌باشد که در طول آن ترک بصورت تناوبی و تدریجی اشاعه پیدا می‌کند و سطح شکست نسبتاً همواری را برجای می‌گذارد. این رشد تا مرحله بحرانی ادامه خواهد داشت و درنهایت در ناحیه سوم، شکست نهایی بصورت سریع و ناگهانی و متأثر از رفتار شکست ماده اتفاق خواهد افتاد [۸-۹].

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

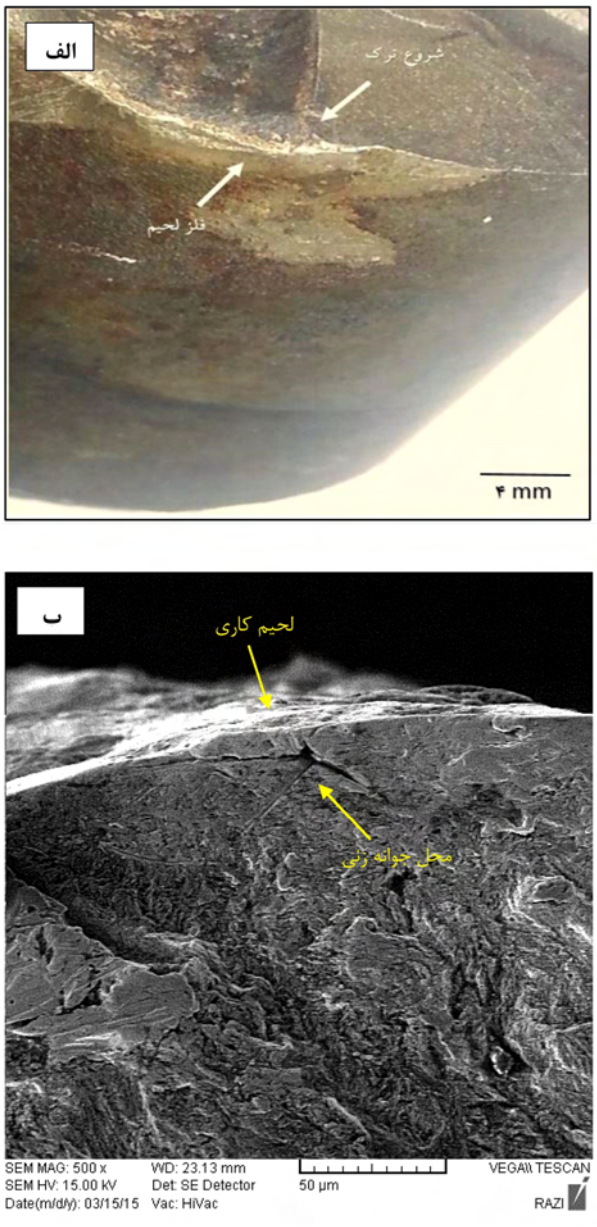
از آنجایی که قسمت عمده سطح شکست را، ناحیه رشد ترک خستگی تشکیل داده و ناحیه نهایی بخش کوچکی از کل سطح شکست را شامل می‌شود (کمتر از یک سوم)، شکست از نوع شکست خستگی سیکل بالا (HCF) می‌باشد و تعداد سیکل یا چرخه زیادی برای رشد ترک صرف شده است.

خطوط ساحلی در هر دو طرف سوراخ به خوبی دیده می‌شوند. جهت انحنای این خطوط ساحلی نشان می‌دهد که ترک از سمت محدب (سمت مکش) پره و از نزدیک سوراخ مربوط به عبور سیم مستهلک کننده شروع شده و به سمت قسمت مقعر (سمت فشار) پره کشیده شده است. جهت بررسی دقیق تر این نواحی در بزرگنمایی بالاتر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد که تصویر آن در شکل(۴) ارائه شده است. در این شکل خطوط مواج میکروسکوپی به خوبی دیده می‌شوند که این خطوط به عبارتی اثر انگشت شکست با مکانیزم خستگی بوده و نشانگر وجود بارهای نوسانی در حین سرویس و مراحل رشد ترک خستگی می باشد .



شکل ۴- خطوط مواج در تصویر میکروسکوپ SEM.

همچنین شکل‌های(۵-الف و ۵-ب)، نشان می دهند که ترک اولیه از قسمتی نزدیک لبه لحیم کاری سخت شده که محل اتصال سیم مستهلک کننده به پره بوده، آغاز گردیده است، به عبارتی جوانه زنی ترک در ارتباط و متاثر از فرایند لحیم کاری بوده است. وجود سوراخ درون پره، خود عامل تمرکز تنش بوده و محل اتصال پره به سیم مستهلک کننده نیز به علت شکل و غیر یکنواختی هندسی منطقه‌ی لحیم سخت، از محل‌های تمرکز تنش می‌باشد. لذا این ناحیه مستعد جوانه زنی ترک بوده است. ضمنا با توجه به دمای ذوب سیم نقره‌ای استفاده شده، لحیم کاری با دمای بالا انجام گرفته است، لذا یکی دیگر از احتمالات، تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند لحیم کاری سخت دمای بالا می‌باشد که جوانه زنی ترک را تسهیل نموده است .



شکل ۵- تصویر ماکروسکوپی (الف) و میکروسکوپ الکترونی (ب) از نزدیک محل شروع ترک و ناحیه لحیم سخت شده.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]

مطابق اطلاعات موجود، لحیم‌کاری درز بین سیم‌های مستهلک کننده ارتعاشات و سوراخ ایرفویل پره‌ها به وسیله سیم نقره L-Ag25Cd (BAg-33) انجام‌گرفته است [۱۰]. ترکیبات اصلی تشکیل دهنده این سیم و درصد وزنی آن‌ها و همچنین شرایط دمایی آن در جدول(۲) نشان داده‌شده است.

شکل(۶) لحیم سخت باقی مانده درون سوراخ ایرفویل پره را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد فلز پرکننده لحیم سخت، تمام سوراخ را در بر نگرفته است و ناپیوستگی قابل توجهی در آن مشهود است. عدم پیوستگی فلز لحیم در این ناحیه می‌تواند بیان‌کننده این نکته باشد که فاصله بین سیم مستهلک کننده و سوراخ ایرفویل پره طی عملیات لحیم‌کاری سخت، به‌خوبی توسط فلز لحیم پر نشده است.



شکل ۶- عدم پیوستگی فلز لحیم باقی مانده درون سوراخ ایرفویل پره.

این شرایط می‌تواند احتمال عدم اتصال مناسب و ثابت بین سیم و پره را مطرح کند که در این صورت امکان حرکت نسبی این دو جز نسبت به یکدیگر می‌تواند فرض گردد. همچنین عکس‌های گرفته شده به‌وسیله‌ی SEM از لحیم لبه‌ی سوراخ ایرفویل که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل(۷) آورده شده است، عدم اتصال مناسب لحیم سخت به پره و همچنین وجود ریزترک‌های درون فلز لحیم را به‌خوبی نشان می‌دهد.

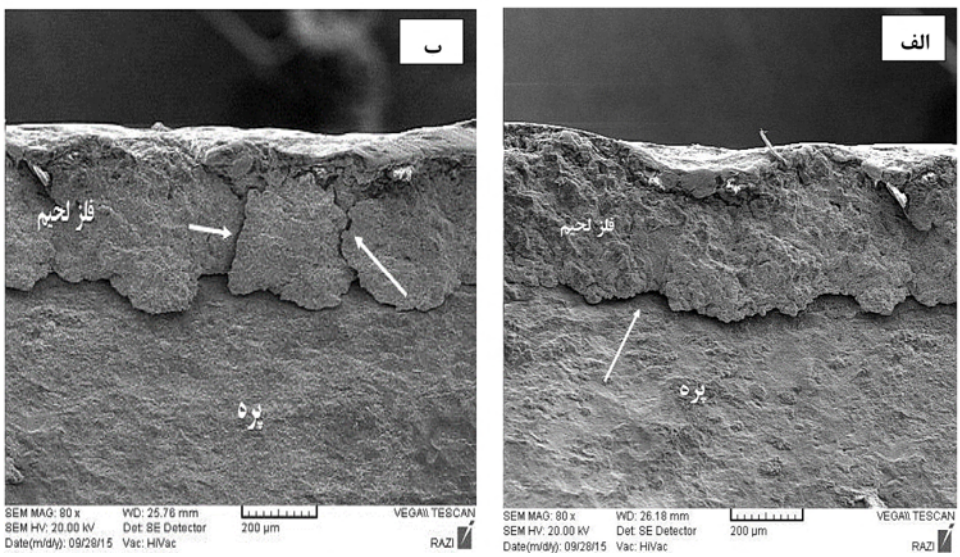
مطابق شکل(۸) رسوبات روی سطح نیز توسط آنالیز پراش پرتو ایکس بررسی شده‌اند که علاوه بر ترکیبات اصلی جنس پره، اکسیژن نیز مشاهده گردید که ممکن است به خاطر قرار گرفتن در معرض هوا به مدت طولانی و یا ناشی از واکنش بخار آب با پره باشد و ترکیبات یا آثار خوردگی شدید یا غیر عادی مشاهده نشده است.

4-نتیجه گیری

در این تحقیق علل شکست پره ردیف ۱۷ توربین بخار نیروگاه بعثت ارزیابی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از انجام بررسی ها و آزمایش های مختلف، در این بخش نتایج بدست آمده از این بررسی ها بدین شرح می باشد:

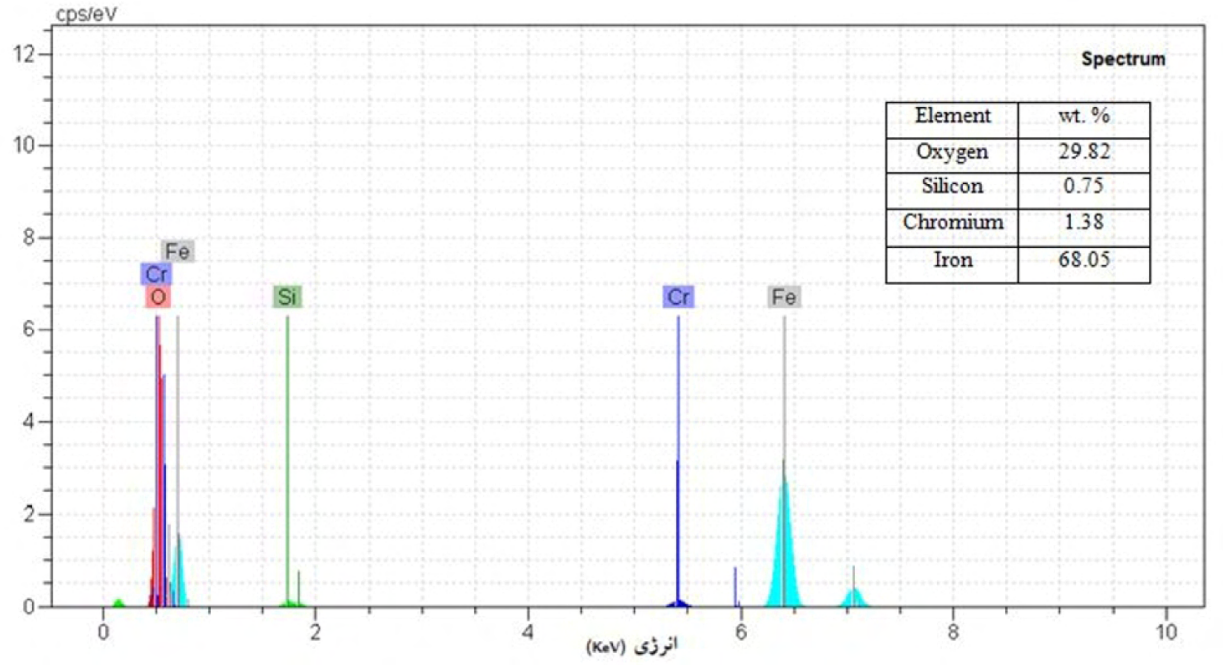
جدول ۲- ترکیب شیمیایی و خواص فلز پرکننده L-Ag 25Cd (BAg-33) [۱۱].

فلز پرکننده	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)				دمای ذوب (ºC)	دمای کاری (ºC)
	Ag	Cu	Zn	Cd		
L-Ag 25Cd (BAg-33)	25	31	26	18	605-720	710



شکل ۷- (الف) عدم اتصال مناسب لحیم سخت به پره و (ب) وجود ریزترک درون فلز پرکننده لحیم (فلش).

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]



شکل ۸- آنالیز پراش پرتو ایکس از رسوبات سطح شکست پره

-آلیاژ پره مطابق با نوع جنس تعریف شده در مدارک مهندسی بوده و هیچگونه غیریکنواختی در ریزساختار ماده پره مشاهده نشده است. همچنین خواص مکانیکی آلیاژ پره حین کارکرد دچار افت نشده است. ازین رو شکست پره ناشی از زوال و افت مشخصات و خواص ریز ساختاری و مکانیکی فلز نبوده است.

-وجود سه ناحیه مجزای جوانه زنی ترک، رشد تدریجی ترک (خطوط ساحلی ماکروسکوپی و خطوط مواج میکروسکوپی) و شکست نهایی دلالت بر شکست پره با مکانیزم رشد ترک خستگی دور بالا دارد.

-جوانه زنی ترک خستگی از مجاورت ناحیه لحیم سخت شده و در کنار سوراخ مستهلک کننده صورت گرفته است که می‌تواند ناشی از کیفیت پایین فرآیند لحیم کاری و عدم اتصال مناسب و تمرکز تنش ناشی از سوراخ رخ داده باشد.

منابع

۱-کاستایوک، ا. " توربین های بخار و گاز"، ترجمه داود توکلی و سید رضا شمشیرگران، انتشارات وزارت نیرو، ۱۳۸۶.

2-Wang, W.Z., Xuan, F.Z., Zhu, K.L. and Tu, Sh.T., "Failure analysis of the final stage blade in steam turbine", *Engineering Failure Analysis*, pp. 632-641, 2007.

3-Das, G., Chowdhury, S.G., Ray, A.K., Das, S.K. and Bhattacharya, D.K., "Turbine blade failure in a thermal power plant", *Engineering Failure Analysis*, pp. 85-91, 2003.

4-Shlyannikov, V.N., Yarullin, R.R. and Zakharov, A.P., "Fatigue of steam turbine blades with damage on the leading edge", *Procedia Materials Science*, pp. 1792-1797, 2014.

5-Rao, J.S., "Application of fracture mechanics in the failure fnalysis of a last stage steam turbine" *Mechanism and Machine Theory*, pp. 599-609, 1998.

6-Azevedo, C.R.F. and Sinátora A., "Erosion-fatigue of steam turbine blades," *Engineering Failure Analysis*, , pp. 2290-2303, 2009.

7-ASM Metal Handbook, Vol. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. 10th ed., ASM international, United States, 1990.

8-Hertzberg, R.W., Vinci, R.P. and Hertzberg, J.L., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 5th ed., Wiley, United States, 1989.

9-Stephens, R.I., Fatemi, A. and Stephens, R.R., H.O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*; 2nd ed., Wiley, United States, 2001.

۱۰-شرکت مدبریت تولید قطعات توربین تجربه نور، "شناسنامه فنی پره متحرک ردیف ۱۷ توربین بخار نیروگاه بعثت تهران"، پروژه شرکت مدیریت تولید برق بعثت، ۱۳۸۰.

11-ASM Metal Handbook, Vol. 6, *Welding, Brazing and Soldering*, 9th ed., United States, 1997.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-30]