



مروری بر رفتار سایشی قطعات داغ توربین‌های گازی

علی رضا طوسی^۱، فاطمه سادات سیدان^۳

^۱. شرکت نیرو پژوه شرق (مسئول آزمایشگاه‌های خوردگی داغ و متالوگرافی)

^۲. دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

^۳. دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی (استادیار)

چکیده

یکی از راه‌های تولید انرژی الکتریکی استفاده از توربین‌های گازی در نیروگاه‌ها به عنوان مبدل انرژی حاصل از سوخت گاز و یا گازوئیل به انرژی مکانیکی و در نهایت انرژی الکتریکی می‌باشد. توربین‌های گازی علاوه بر تولید انرژی الکتریکی (توربوژنراتورها)، به عنوان وسیله‌ای برای ایجاد فشار در ایستگاه‌های انتقال گاز در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها (توربوکمپرسورها) مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه در قسمت‌های داغ توربین، قطعات در معرض اکسیداسیون دمای بالا، خوردگی ناشی از نمک‌های مذاب یا همان خوردگی داغ، خوردگی فرسایشی، انواع پدیده‌های تریبولوژیکی، پدیده خستگی حرارتی، خزش و ... هستند، دانش فنی جلوگیری از تخریب و همچنین بازسازی این قطعات مورد توجه می‌باشد. پدیده سایش و تریبولوژی یکی از همین موارد است. با توجه به اینکه قطعات داغ، پس از یک کارکرد مشخص نیاز به بازسازی دارند، شناخت مکانیزم‌های سایش در بحث جلوگیری از ایجاد این آسیب و همچنین عمل بازسازی بعد از آسیب نیز می‌تواند مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: سایش؛ توربین گاز؛ قطعات داغ

^۱. Alireza.toosi.kh@gmail.com

مقدمه

توربین گاز از دو بخش سرد و داغ تشکیل شده است. همانطور که از شکل ۱ مشخص است، در قسمت سرد توربین شاهد پره‌های کمپرسور هستیم. وظیفه این پره‌ها فشرده کردن هوا و راندن آن به سمت قسمت داغ و محفظه احتراق^۱ توربین است. ترکیب هوای فشرده با گاز و سپس احتراق، نیروی مکانیکی زیادی به وجود آورده و باعث چرخش پره‌های متحرک توربین می‌شود [۱].

اجزای قسمت داغ شامل نازل سوخت بوده که وظیفه هدایت سوخت به محفظه احتراق را بر عهده دارد. پس از آن سوخت در محفظه احتراق که بسته به نوع توربین تعداد معمولاً بالای ۱۰ عدد است، توسط جرقه‌زن^۲ دچار انفجار می‌شود. باتوجه به اینکه توربین دارای دو عدد جرقه‌زن می‌باشد، حریق از طریق کراس‌فایرتیوب^۳ به سایر محفظه‌های احتراق گسترش می‌یابد و به نوعی محفظه‌های احتراق از طریق کراس‌فایرتیوب‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. پس از اینکه گاز دچار حریق شد، از طریق ترانزیشن^۴ به سمت نازل‌ها یا همان پره‌های ثابت توربین هدایت می‌شود. وظیفه اصلی ترانزیشن، تبدیل سطح مقطع دایروی گاز از سمت محفظه احتراق به سطح مقطع دوزنقه‌ای شکل برای اتصال به نازل‌ها است. شکل ۲، دو قطعه محفظه احتراق و ترانزیشن را نشان می‌دهد.

گاز پس از ورود به ترانزیشن، وارد نازل ردیف اول توربین شده و وظیفه دارد که با بازدهی حداکثر، گاز را به پره‌های متحرک سوق دهد و باعث چرخش آن شود. از آنجایی که گاز می‌تواند از نوک پره‌ها فرار کرده و بازدهی توربین را کاهش دهد، ارتفاع نوک پره‌ها باید به گونه‌ای باشد که از هدررفت گاز جلوگیری شود. به این منظور قطعاتی فداشونده در توربین طراحی شده‌اند که از برخورد احتمالی پره با پوسته توربین در اثر کاهش این فاصله و افزایش بازدهی، جلوگیری شود. این قطعات شروود^۵ نام دارند [۱].

سایش در قطعات داغ توربین گاز

نازل‌های سوخت از طریق کپ کولار^۶ به محفظه احتراق متصل هستند. باتوجه به وجود ارتعاشات زیاد و بسیار شدید توربین، قطعات نازل سوخت، با قسمت داخلی کپ کولار ایجاد سایش می‌کند. قسمت داخلی کپ کولار نیز با توجه به اینکه قطعه‌ای جداشونده از کپ کولار خارجی بوده، در اثر ارتعاشات توربین نیز ایجاد سایش با کپ کولار خارجی می‌کند [۱]. شکل ۳ شماتیکی از محفظه احتراق و همچنین سایش در قسمت‌های مذکور و فرآیند جوشکاری به جهت بازسازی قطعات تخریب شده را نشان می‌دهد. باتوجه به اینکه این قطعات حرکت نسبی در اثر ارتعاش روی هم دارند، می‌توان مکانیزم سایش را نوسانی^۷ در نظر گرفت.

1. Combustion Liner

2. Igniter

3. Crossfire Tube

4. Transition Piece

5. Shroud Segment

6. Collar Cap

7. Fretting

محفظه احتراق از طریق قسمت استاپ^۱ به جهت تثبیت موقعیت، به بدنه خود متصل می‌باشد. همانطور که گفته شد کراس فایرتیوب‌ها وظیفه اتصال محفظه‌های احتراق را به یکدیگر بر عهده دارند. این کراس فایرتیوب از قسمت فایرتیوب کولار به بدنه محفظه احتراق متصل می‌شود. در اثر ارتعاشات حاصل از احتراق و همچنین حرکت پره‌های متحرک توربین، قسمت‌های استاپ که به بدنه متصل بوده، و همچنین کراس فایرها که داخل فایرتیوب کولار قرار دارند دچار حرکت نوسانی بر روی هم می‌شوند که در دراز مدت، ایجاد سایش در این قسمت‌ها را شاهد هستیم [۱]. می‌توان مکانیزم ایجاد این سایش را نیز نوسانی در نظر گرفت. شکل ۴ قسمت‌های مختلف قطعات تخریب شده حاصل از سایش در قسمت‌های مذکور و همچنین جوشکاری آن را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۳- الف پیداست، قسمت انتهایی محفظه احتراق که در تماس با ترانزیشن می‌باشد، اسپرینگ سیل^۲ نام دارد. اسپرینگ سیل قطعه‌ای فنر مانند است که باعث قفل شدن محفظه احتراق در درون ترانزیشن می‌شود. در نتیجه شاهد سایش هم در قسمت انتهایی ترانزیشن و هم در قسمت فنری محفظه احتراق می‌باشیم. این مدل سایش را می‌توان سایش مفید در نظر گرفت؛ زیرا می‌توان اطمینان داشت که محفظه احتراق کاملاً درون ترانزیشن جای گرفته و کمترین میزان لغزش اتفاق می‌افتد [۲]. شکل ۵ و همچنین شکل ۶- ب سایش را به خوبی در این قسمت‌ها نشان می‌دهد. می‌توان دو نوع سایش برای این قسمت‌ها متصور شد. زمانی که توربین را مونتاژ و دیمونتاژ می‌کنند، قسمت اسپرینگ سیل حرکت کامل بر روی انتهای ترانزیشن دارد و سایشی که در این قسمت اتفاق می‌افتد از نوع خراشان^۳ بوده و برای اطمینان از اتصال کامل این دو قطعه به یکدیگر است. اما زمانی که توربین در حال کار است، به دلیل ارتعاشات شدید و لغزش دو قطعه بر روی هم، می‌توان مکانیزم را متفاوت و سایش نوسانی در نظر گرفت.

همانطور که ذکر شد، ترانزیشن در قسمت بعد محفظه احتراق قرار دارد که گاز به آن می‌رسد. در قسمت انتهایی این قطعه که اسپرینگ سیل به آن متصل است شاهد سایش می‌باشیم. ترانزیشن در برخی توربین‌ها دارای براکت^۴ در قسمت نزدیک به قاعده دایروی آن می‌باشد که به پوسته خود متصل است. ترانزیشن‌ها همچنین از قسمت‌های کناری خود که سیل اسلات^۵ نام دارد، از طریق یک قطعه نواری شکل، به ترانزیشن‌های اطراف متصل می‌شود [۲]. تمامی این قسمت‌ها در اثر ارتعاش توربین دچار سایش نوسانی شده و نیازمند جوشکاری جهت بازسازی می‌شوند. شکل ۶، قسمت‌های در معرض سایش و همچنین فرآیند جوشکاری آن‌ها را نشان می‌دهد.

^۱. Liner Stop

^۲. Spring Seal

^۳. Abrasion

^۴. Bracket

^۵. Seal Slot

احتراق پس از ترانزیشن وارد نازل‌ها^۱ (پره‌های ثابت) و سپس پره‌های متحرک^۲ می‌شود. معمولاً ایرفویل^۳ (قسمتی که با گاز در تماس است) پره‌ها و نازل‌ها دچار خوردگی داغ و همچنین سایش می‌شوند. این سایش معمولاً به دلیل ورود ذرات و غبار ساینده ناشی از آلودگی هوا به توربین اتفاق می‌افتد. معمولاً این نوع سایش، خوردگی را به دلیل از بین بردن لایه اکسیدی تقویت می‌کند و ایرفویل را دچار خوردگی فرسایشی^۴ می‌کند. این مکانیزم در قطعات قبلی یعنی محفظه احتراق و ترانزیشن نیز ممکن است اتفاق افتد، خصوصاً اگر از پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی و حرارت استفاده نشود. حتی در صورت داشتن پوشش در قسمت داخلی محفظه احتراق و ترانزیشن، اگر پوشش دارای چسبندگی خوبی نباشد، به عنوان مثال آلودگی سطحی قبل از پوشش‌دهی روی سطح وجود داشته باشد و یا پارامترهای پوشش‌دهی به درستی انتخاب نشده باشند، ممکن است پوشش از همان قسمت دچار کندگی و شکست شود و قطعات بعدی توربین (نازل‌ها و پره‌ها) را دچار سایش و تخریب کند [۲].

همچنین اگر ترک‌های ایجاد شده بر روی نازل‌ها در فرآیند بازسازی قبلی اصلاح نشده و تست‌های غیرمخرب از جمله بازرسی چشمی^۵ و بازرسی مایع نافذ^۶ بر روی قطعات انجام نگیرد، حین کار ترک اشاعه پیدا کرده و شکست آن، سایر قطعات را دچار سایش و تخریب می‌کند.

همانطور که گفته شد قطعه‌ای در توربین وجود دارد به نام شرودها. این قطعه فداشونده وظیفه دارد تا از خروج گاز از نوک پره و به تبع آن از کاهش بازدهی چرخش پره جلوگیری کند. بنابراین فاصله بین نوک پره تا شرودها باید بسیار اندک باشد. گاهی به دلیل انبساط پره‌ها و شرودها در دمای بالا، این دو قطعه بر روی هم برخورد فیزیکی دارند که نتیجه آن ایجاد سایش بر روی هر دو قطعه (هم پره و هم شرودها) می‌باشد. وجود این سایش از هدررفت گاز جلوگیری کرده و تقریباً تمام حجم گاز از ایرفویل عبور کرده و باعث ایجاد بازدهی حداکثری می‌شود [۳].

همچنین قسمت انگل‌وینگ^۷ پره‌ها متصل به سیل پره^۸ می‌باشد که دلیل آن، جلوگیری از هدررفت گاز از سمت پایینی پره است. در این قسمت هم به دلیل انبساط شاهد برخورد انگل‌وینگ به سیل پره هستیم که تمامی این نواحی در معرض سایش برای فرآیند بازسازی اصلاح می‌شوند. مکانیزم حاصل از سایش در قسمت‌های انگل‌وینگ، شرودها و همچنین نوک پره‌ها را می‌توان خراشان دانست. شکل ۷، نواحی در معرض سایش برای پره‌های متحرک و شکل ۸، برای پره‌های ثابت را نشان می‌دهد.

1. Vanes

2. Buckets

3. Airfoil

4. Erosion Corrosion

5. Visual Inspection

6. Dye Penetrant Inspection

7. Angle Wing

8. Bucket Seal

نتیجه گیری

۱) عمده سایشی که در قطعات داغ توربین اتفاق می افتد، به دلیل ارتعاشات توربین و حرکت لغزشی آنها بر روی یکدیگر است. در محفظه احتراق، قسمت استاپ در تماس با پوسته، نازل سوخت در تماس با کپ کولار و کراس فایر تیوب در تماس با فایر تیوب کولار این نوع سایش مشاهده می شود. همچنین در ترانزیشن ها در قسمت های سیل اسلات و براکت این نوع سایش به راحتی قابل رویت است. این سایش در هر شرایطی اتفاق افتاده و قابل پیشگیری نمی باشد و دلیل آن هم عدم کنترل ارتعاشات توربین بوده و در نتیجه در پروسه بازسازی این قطعات همواره در این قسمت ها سایش نوسانی مشاهده می شود.

۲) معمولاً طی فرایند بازسازی، طول پره های توربین به گونه ای تنظیم و اصلاح می شوند که کمترین فاصله بین آنها و شرودهای توربین وجود داشته باشد که دلیل آن، جلوگیری از اتلاف گاز و کاهش راندمان است. معمولاً به دلیل انبساط پره ها در دمای بالا امکان برخورد نوک پره به شروود وجود داشته و به تبع آن سایش خراشان در آنها دیده شده است که در فرایند بازسازی بعدی باید این کاهش ارتفاع مجدد جبران شود. این مکانیزم سایشی در قسمت انگل وینگ پره ها که از اتلاف گاز از سمت پایین جلوگیری می کنند و همچنین در اسپرینگ سیل های محفظه احتراق که در تماس با ترانزیشن می باشد نیز حین مونتاژ و دیمونتاژ آنها دیده می شود.

۳) سایش فرسایشی یکی دیگر از پدیده های مخرب در توربین ها بوده که وابستگی زیادی به شرایط محیطی از جمله آلودگی های اطراف توربین و پوشش دهی و بازسازی نامناسب قطعات دارد که نتیجه آن، کندگی پوشش یا قسمتی از قطعه و به دنبال آن، ایجاد سایش برای سایر قطعات در مسیر گاز را در بر خواهد داشت. در صورتی که سایش فرسایشی در حضور نمک های مذاب که علت وقوع خوردگی داغ هستند اتفاق افتد، مکانیزم خوردگی فرسایشی را شاهد هستیم. این مکانیزم اغلب در ایرفویل پره ها و نازل ها دیده شده است.

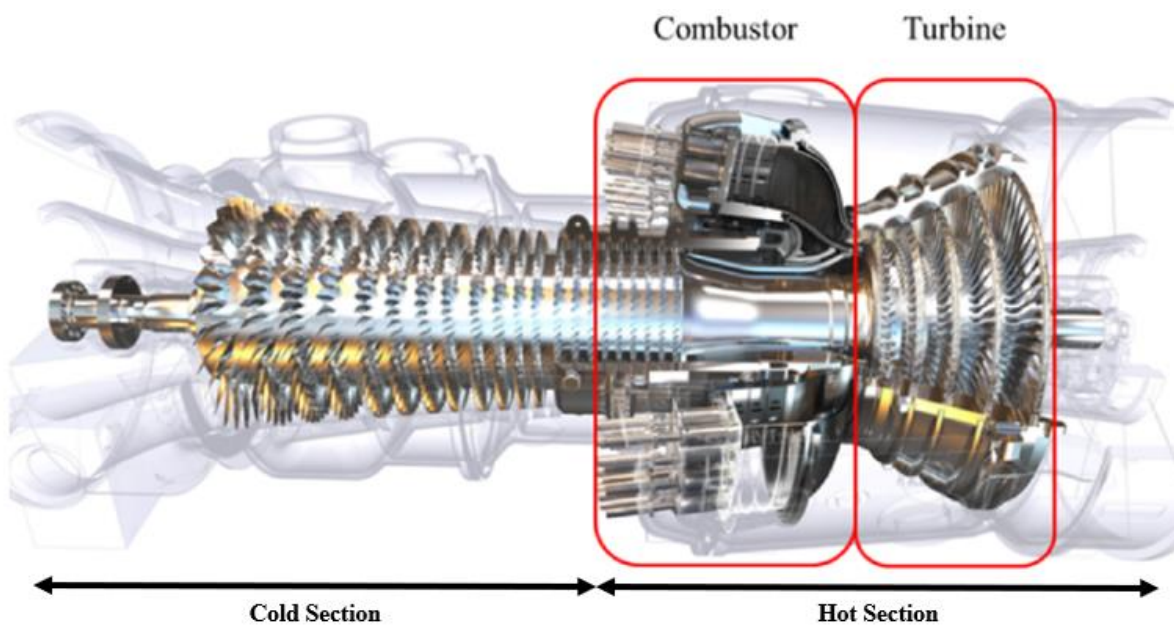
تشکر و قدردانی

تشکر و قدردانی از مهندسان عزیز شرکت نیرو پژوه شرق که تصاویر مندرج در مقاله نیز برگرفته از قطعات موجود در این شرکت است.

مراجع

- [1] Tony Giampaolo, Gas Turbine Handbook: Principles and Practice, CRC Press, 4th edition, 2009.
- [2] H. I. H. Saravanamuttoo, Gordon Frederick Crichton Rogers, Henry Cohen, Gas Turbine Theory, Subsequent Edition, Prentice Hall, 2001.
- [3] J. H. Horlock and William W. Bathie, Advanced Gas Turbine Cycles, Elsevier, 1st Edition, 2003.

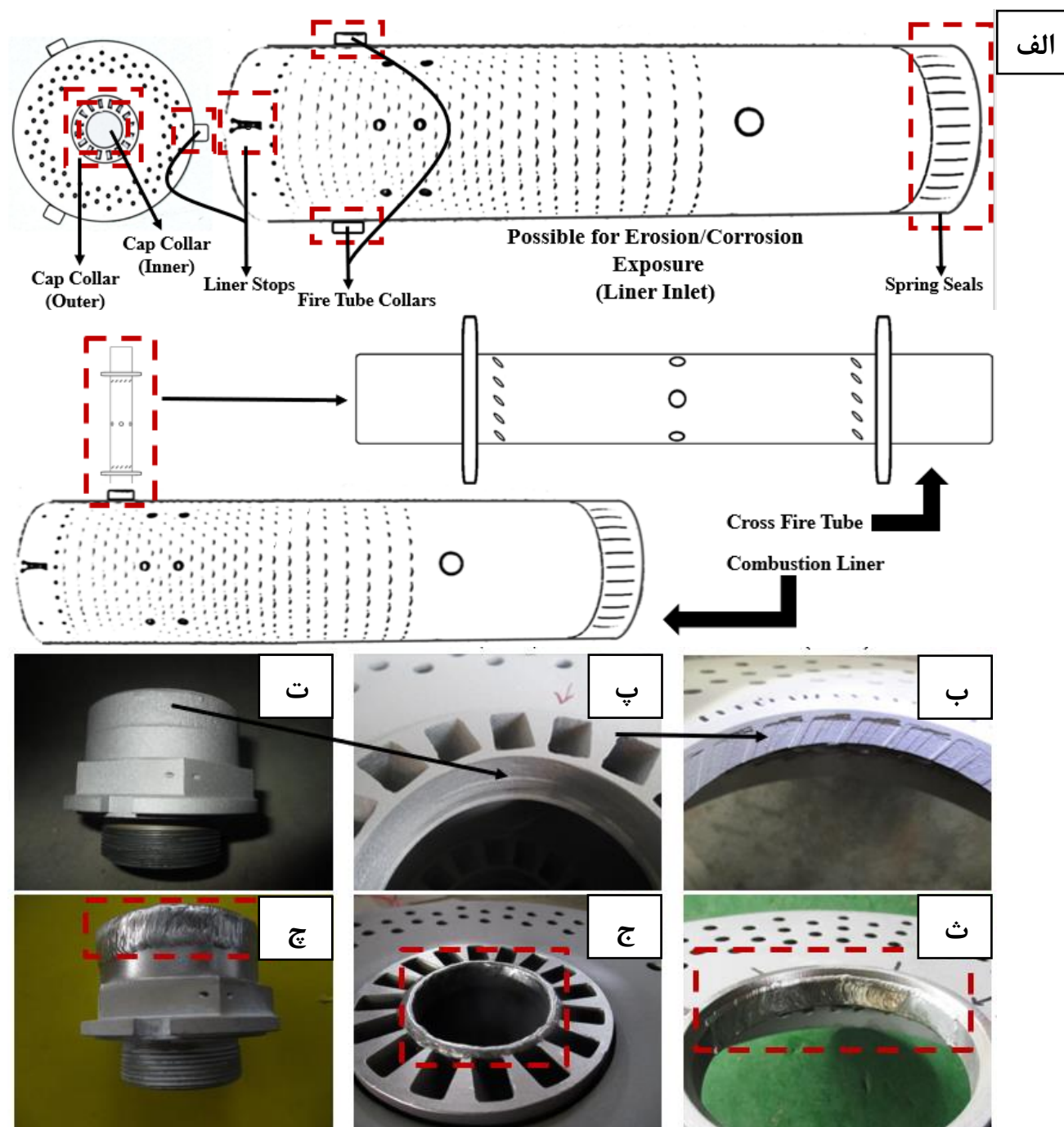
مروری بر رفتار سایشی قطعات داغ توربین های گازی



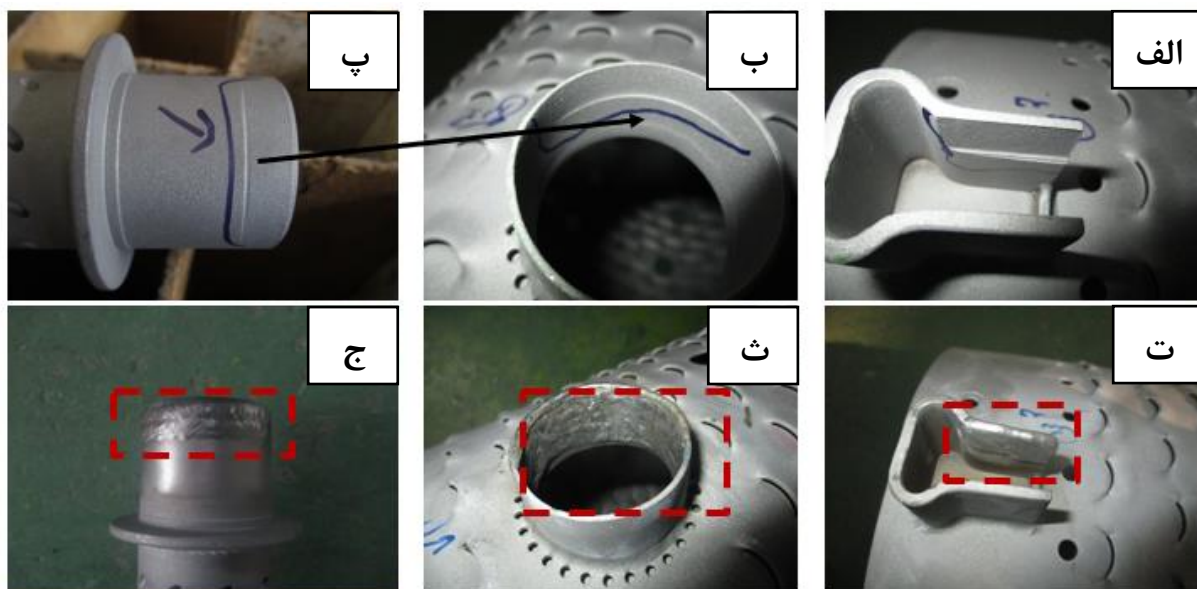
شکل ۱. شماتیک قسمت های سرد و داغ توربین گاز.



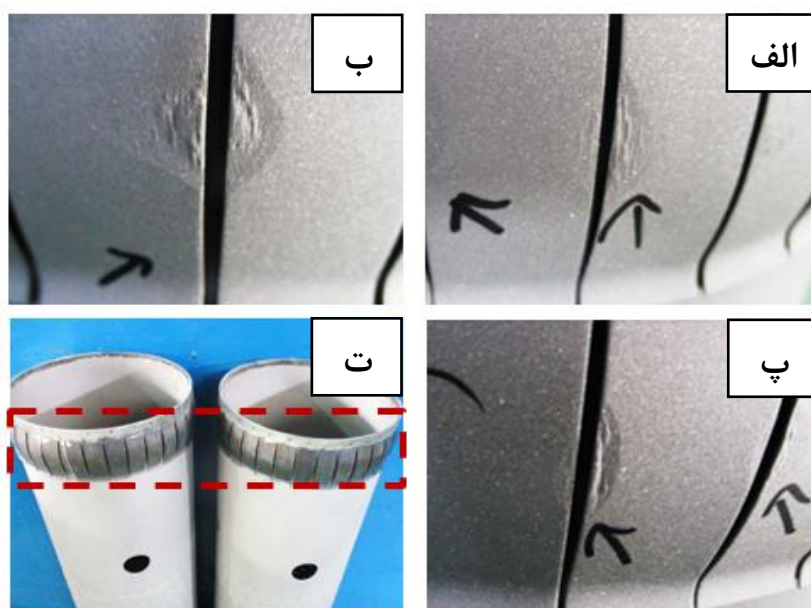
شکل ۲. الف) ترانزیشن بسته شده بر روی پره های ثابت؛ ب) ترانزیشن؛ پ و ت) محفظه احتراق.



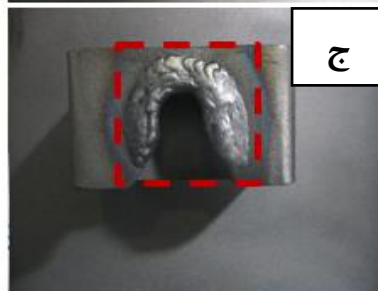
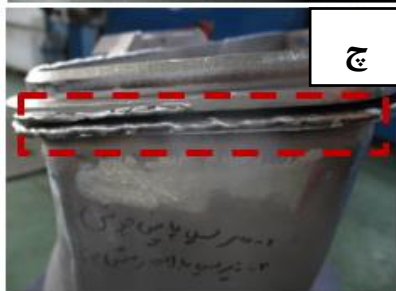
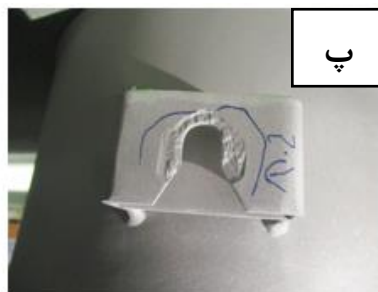
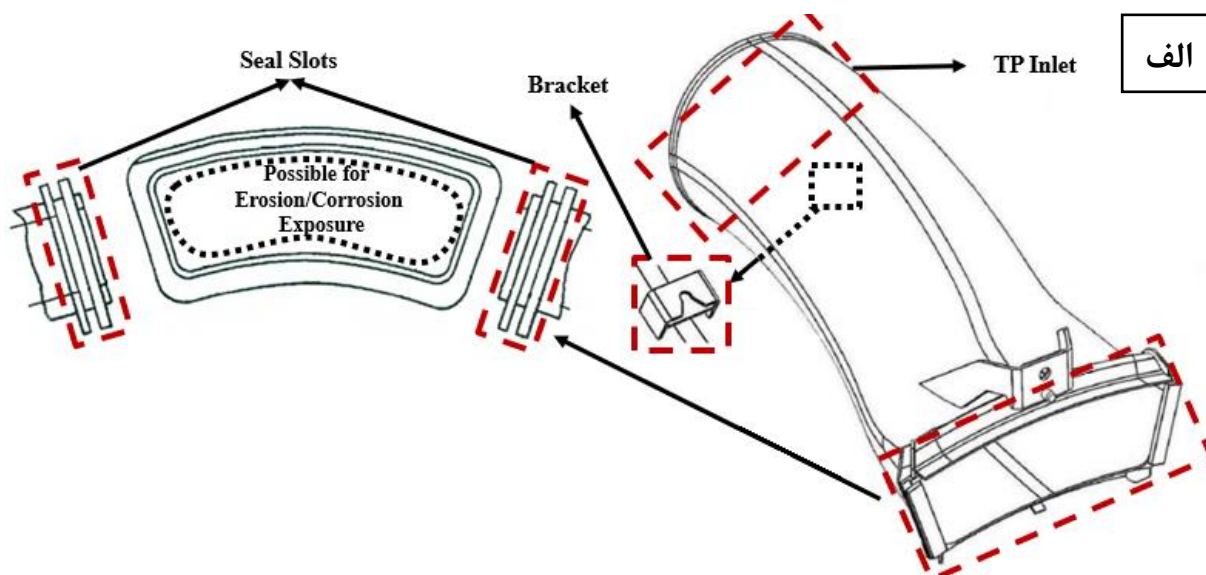
شکل ۳. الف) قسمت‌های مختلف محفظه احتراق؛ ب) سایش در قسمت خارجی کپ کولار؛ پ) سایش در قسمت داخلی کپ کولار؛ ت) سایش در نازل سوخت؛ ث، ج و چ) جوشکاری محل سایش.



شکل ۴. الف) سایش در قسمت استاپ؛ ب) سایش در قسمت فایرتیوپ کولار؛ پ) سایش در کراس فایرتیوپ؛ ت، ث) جوشکاری محل سایش.

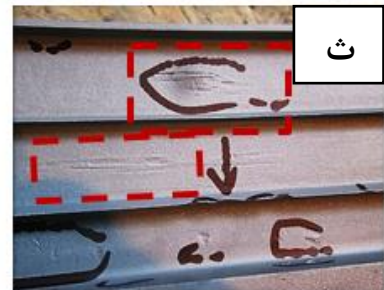
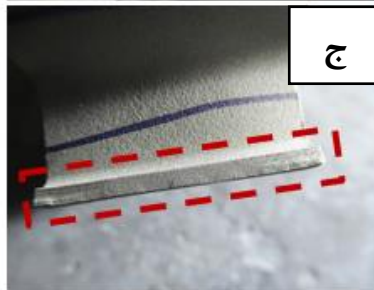
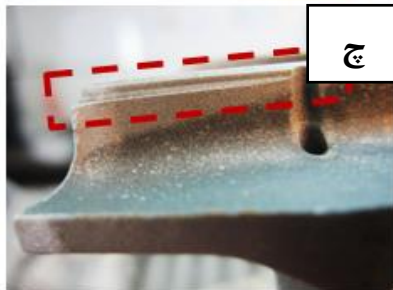
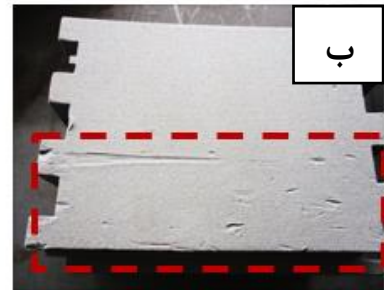
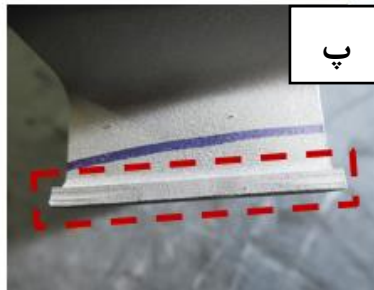
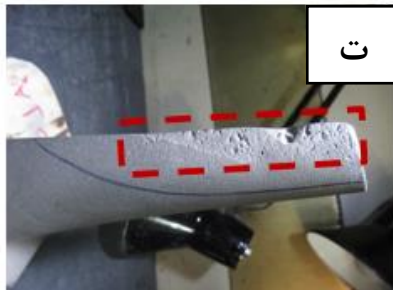
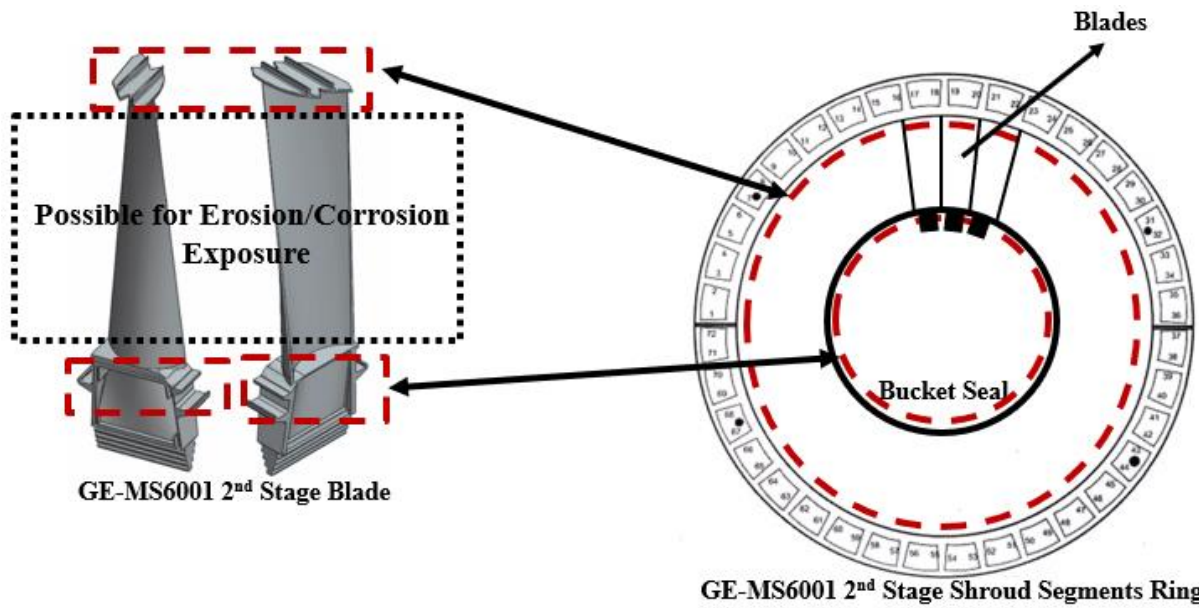


شکل ۵. الف، ب و ج) سایش در اسپرینگ سیل؛ ت) جایگزینی اسپرینگ سیل.



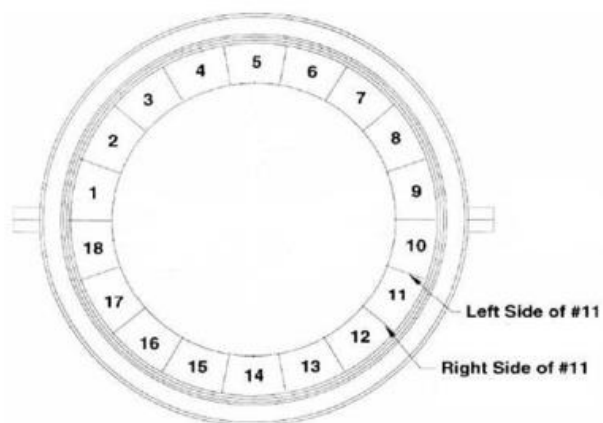
شکل ۶. الف) قسمت‌های مختلف ترانزیشن؛ ب) سایش در قسمت داخلی قاعده دایره؛ پ) سایش در براکت؛ ت) سایش در داخل سیل اسلات؛ ث، ج و چ) جوشکاری محل سایش.

الف

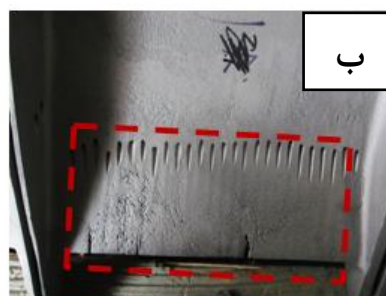
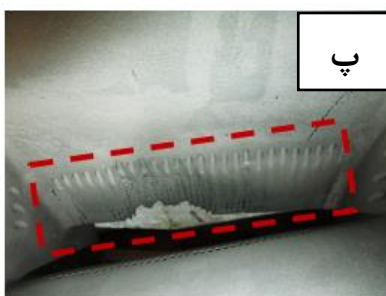


شکل ۷. الف) قسمت های مختلف پره های متحرک؛ ب و ث) سایش در شرودها و قسمت رو به پره های متحرک؛ پ و ج) سایش در قسمت انگل وینگ؛ ت) سایش و خوردگی داغ در قسمت تحدب و لبه حمله ایرفویل؛ چ) سایش در قسمت بالای شرودریل.

الف



Possible for Erosion/Corrosion
Exposure



شکل ۸ الف) پره‌های ثابت توربین به همراه شکل شماتیک؛ ب، پ و ت) سایش و خوردگی داغ در قسمت تقعر ایرفویل.