

ارزیابی مقدماتی سیستم احتراق نسل سوم موتور IGT25، قسمت دوم: بررسی آسیب‌ها و تخمین عمر خزشی

سیده فاطمه موسوی^۱، مهدی بقایی^{۲*}، سینا ثانی^۳، محمدعلی سرودی^۴، محمد علیزاده^۵

^۱ کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، واحد ارتقاء، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، f.moosavi@turbotec-co.com

^۲ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، واحد ارتقاء، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، m.baghaei@turbotec-co.com

^۳ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، واحد مهندسی، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، m.baghaei@turbotec-co.com

^۴ کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، مدیر دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، m.soroudi@turbotec-co.com

^۵ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، معاون مهندسی، شرکت توربوتک، تهران، m.alizadeh@turbotec-co.com

*نویسنده مخاطب

چکیده

جابه‌جا شده و دو شکاف مماسی ایجاد کرده‌اند. هوای ورودی به محفظه به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت عمده هوای ورودی (حدود ۸۰ درصد) وارد برنر شده و مستقیماً وارد فرآیند احتراق می‌گردد. مابقی هوای ورودی نیز بین مسیرهای خنک‌کاری و سوراخ‌های رقیق‌سازی توزیع می‌شود. سوخت گازی مسیر اصلی از تعداد زیادی سوراخ به صورت عرضی در مسیر هوای شیارهای طولی برنر تزریق می‌گردد. سوخت گازی پایلوت^۸ و سوخت مایع از انژکتورهای نوک برنر به درون ناحیه مرکزی برنر تزریق می‌شود [۱]. سیستم احتراق این توربین گاز دارای یک سامانه اشتعال جرعه منفرد می‌باشد. پس از مشتعل شدن برنر مجاور شمع الکتریکی و پایدار شدن شعله این برنر، انتشار شعله به صورت عرضی صورت گرفته و در نهایت تمام برنرها روشن می‌شوند.

کاربرد نسل سوم سیستم احتراق در محصولات خانواده IGT25 با هدف افزایش انعطاف‌پذیری عملکردی، بهبود قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیر بودن موتور مد نظر قرار گرفته است. مقاصد اصلی در ارتقاء این موتور، افزایش طول عمر قطعات داغ موتور، کاهش سطح تولید آلاینده‌ها و همچنین بهبود در عملکرد موتور با سوخت مایع است. برای دستیابی به اهداف تعیین شده در ارتقاء محصول، سیستم احتراق به صورت کامل بازطراحی شده است. در این پژوهش پس از معرفی مختصر سیستم احتراق IGT25، به بررسی خرابی محفظه احتراق‌های کار کرده پرداخته شده است. در نتیجهی مطالعات میدانی در سیستم خنک‌کاری، شرایط تکیه‌گاهی و نوع اتصال برنرها^۱ به لاینر^۲ موتور IGT25 بازنگری شده است. برای بررسی عملکرد محفظه احتراق IGT25 با سیستم احتراق نسل سوم، شبیه‌سازی جریان و تحلیل استاتیک با در نظرگیری اثر خزش به ترتیب در نرم‌افزارهای فلوئنت^۳ و آنسیس^۴ انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که محفظه احتراق نسل سوم IGT25 با ایجاد اختلاط مناسب، پروفیل جریان خروجی یکنواختی را ایجاد می‌کند. همچنین مجموع آسیب خزشی پس از ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد محفظه احتراق در بار کامل، نشان از عمر خزشی بالا دارد. با توجه به تأثیر مستقیم عمر خزشی بر دوره‌ی بازدید و تعمیرات که از مسائل پر اهمیت در صنایع توربینی به شمار می‌آید؛ دوره تعمیرات محفظه احتراق نسل جدید افزایش می‌یابد.

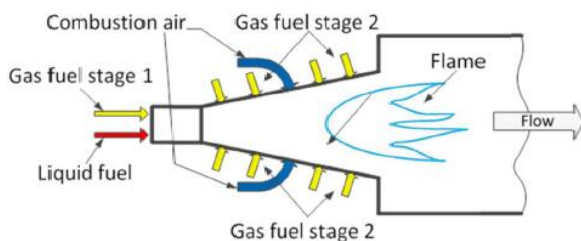
کلمات کلیدی: محفظه احتراق نسل سوم، IGT25، برنر DLE، عمر خزشی

مقدمه

توربین گاز IGT25 یک توربین گاز صنعتی دوجوره با توان نامی ۲۵ مگاوات و راندمان حدود ۳۵ درصد (در شرایط کاری استاندارد) است که برای اولین بار در اواخر سال ۱۳۹۳ تحویل شرکت ملی گاز ایران شده است. نسبت فشار این موتور ۱۴، دبی و دمای گازهای خروجی به ترتیب معادل ۸۰،۴ کیلوگرم بر ثانیه و ۵۴۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این توربین قابلیت استفاده از طیف وسیعی از سوخت‌های گازی و مایع در انواع کاربردهای تولید گشتاور و تولید توان را دارا می‌باشد. سیستم احتراق این توربین گاز متشکل از دیفیوزر ورودی، محفظه احتراق (شامل برنرها، لاینر و کیسینگ^۵) و سیستم‌های جانبی سوخت می‌باشد. محفظه احتراق موتور IGT25 از نوع حلقوی^۶ و شامل ۱۸ عدد برنر DLE^۷ نسل دوم است. سطح تولید آلاینده‌های NO_x این برنر در عملکرد موتور با سوخت‌های گاز و مایع به ترتیب حدود ۲۵ ppm و ۴۲ ppm است. نمونه‌ای از محفظه احتراق موتور IGT25 در شکل ۱ مشاهده می‌شود. مطابق با شکل ۲، برنر DLE نسل دوم متشکل از دو پوسته نیم مخروطی است که به موازات محور



شکل ۱: محفظه احتراق موتور IGT25



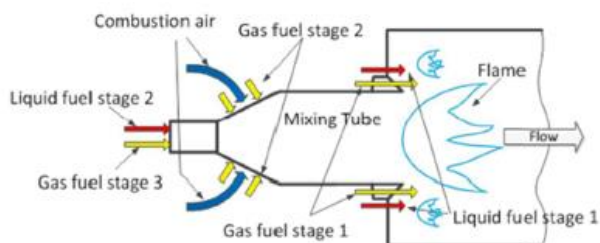
شکل ۲: برنر DLE نسل دوم محفظه احتراق موتور IGT25 [۲]

بررسی نمونه‌های کار کرده محفظه احتراق توربین گاز IGT25 و مشاهدات میدانی حاکی از آن است که آسیب در برنر محفظه احتراق قابل ملاحظه می‌باشد. شکل ۳، نمونه‌ای از این آسیب‌ها را نشان می‌دهد که منجر به

^۵ Casing
^۶ Annular
^۷ Dry Low Emission
^۸ Pilot

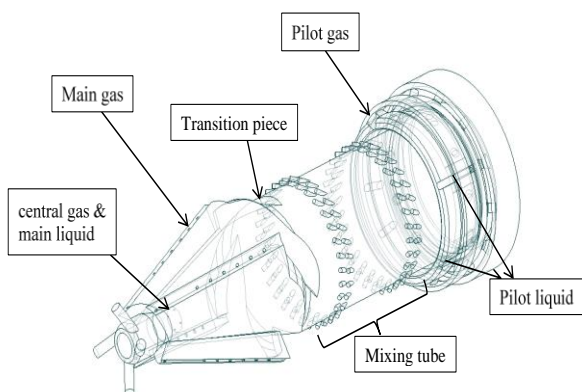
^۱ Burner
^۲ Liner
^۳ Fluent
^۴ ANSYS

نوک مخروط مسیری برای سوخت تزریق گاز و مایع تعبیه شده است. از قابلیت‌های مهم برنرهای نسل سوم مسیره‌های سوخت پیلوت^۱ گاز و مایع در صفحه‌ی ریم^۲ برنر است. از مسیر سوخت پیلوت برای احتراق در شرایط بارگذاری‌های کمتر استفاده می‌شود. با این روش، شعله پایدارتر خواهد بود. لذا آسیب‌های احتمالی بخش‌هایی از دیواره داخلی محافظه احتراق که در معرض گاز داغ حاصل از اشتعال قرار دارند، کاهش می‌یابند.



شکل ۵: مسیر سوخت‌رسانی برنر DLE نسل سوم [۲]

مطابق با شکل ۶، بعد از ناحیه مخروطی، ناحیه پره‌مانندی^۳ تعبیه شده است. این بخش با ایجاد چرخش در هوا و تزریق سوخت مایع و گاز به آن، شرایط مناسبی برای اختلاط ایجاد می‌کند. همچنین ناحیه اختلاط^۴ اضافه شده به انتهای بخش مخروطی زمان کافی برای تبخیر سوخت مایع فراهم می‌کند. لذا سطح تولید آلاینده‌ها در عملکرد محافظه احتراق نسل جدید با سوخت مایع پایین‌تر است.



شکل ۶: شماتیکی از برنر DLE نسل سوم

همان‌طور که اشاره شد، از دیگر تغییرات محافظه احتراق نسل سوم IGT25، بهبود در سیستم خنک‌کاری است. مطابق با شکل ۷، با افزایش ردیف‌های سوراخ خنک‌کاری روی دیواره لاینر، دبی جریان هوای خنک‌کاری ورودی افزایش می‌یابد. افزایش دبی هوای خنک‌کاری، روند کاهش دمای دیواره داخلی لاینر را در مقابل جریان داغ بهبود می‌بخشد. با افزایش تعداد سگمنت‌های لاینر نیز فیلم پیوسته‌ی خنک‌کاری روی دیواره لاینر تشکیل می‌شود و از برخورد گاز داغ با فلز دیواره جلوگیری می‌کند. لذا سیستم خنک‌کاری طراحی شده برای محافظه احتراق نسل سوم IGT25 با ایجاد لایه‌ی نازک هوای خنک‌کاری بین سطح قطعه و جریان گاز داغ در طول لاینر، دمای فلز را کاهش می‌دهد و باعث افزایش عمر خزشی می‌شود. همچنین تعداد سوراخ‌های رقیق‌سازی در انتهای لاینر

ایجاد ترک در محافظه احتراق‌های کارکرده شده است. در نتیجه یکی از نقاط بحرانی از منظر عمر محل اتصال برنر به لاینر می‌باشد. چراکه اتصالات جوشی عامل ایجاد تمرکز تنش و رشد ترک می‌شود. لذا بازطراحی در نوع طراحی این اتصال می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر عمر کل محافظه داشته باشد.



شکل ۳: نمونه‌ای از رشد ترک در برنر محافظه احتراق IGT25 کارکرده

محافظه احتراق نسل سوم IGT25

برای دستیابی به اهداف تعیین‌شده در ارتقاء محافظه احتراق IGT-25 راهکارهای مختلفی ارائه شده است. برای بهبود در عملکرد محافظه احتراق، راهکارهایی از جمله ارتقاء برنر، تغییرات در نحوه سوخت‌رسانی و سیستم خنک‌کاری ارائه شده است. راهکارهای ارتقاء عمر نیز شامل تغییر نحوه اتصال برنر به لاینر و افزایش دبی جریان خنک‌کاری در لاینر است. لازم به ذکر است، بازنگری در نحوه اتصال برنر به لاینر و تغییر آن از حالت اتصال دائم به شکلی که برنر قابل تعویض باشد می‌تواند از حیث ساخت و مونتاژ، بازبینی آسان برنر در اورهال و صرفه‌جویی در هزینه‌های نگهداری و تعمیرات مؤثر باشد. در شکل ۴ نمای کلی از محافظه احتراق و برنر نسل سوم IGT25 مشاهده می‌شود.

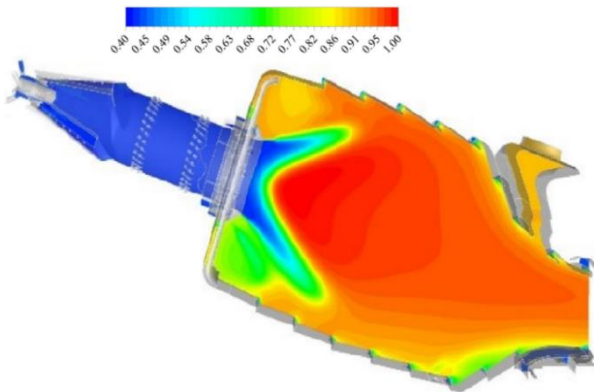


شکل ۴: محافظه احتراق حلقوی و برنر DLE نسل سوم [۳]

یکی از اساسی‌ترین تغییرات در ارتقاء محافظه احتراق نسل سوم IGT25، بهره‌مندی از برنر DLE نسل سوم است. برنر نسل سوم کمک می‌کند تا در عملکرد موتور با سوخت مایع، آلاینده‌های NOx کمتری تولید شود. در شکل ۵، جزئیات مسیره‌های ورود سوخت و هوا در برنر نسل سوم DLE آورده شده است. این برنر شامل یک بخش مخروطی است که دارای چهار شکاف هوا می‌باشد. شکاف‌ها به چرخش جریان در حین ورود به برنر کمک می‌کنند. در ورودی هر شکاف یک استوانه برای ورود سوخت گاز در نظر گرفته شده است. پاشش سوخت از استوانه‌ها به جریان در حال چرخش، شرایط را برای اختلاط مناسب هوا و سوخت فراهم می‌کند. همچنین در

³ Transition Piece
⁴ Mixing Zone

¹ Pilot
² Rim



شکل ۸: توزیع دما در مقطع میانی محفظه احتراق نسل سوم

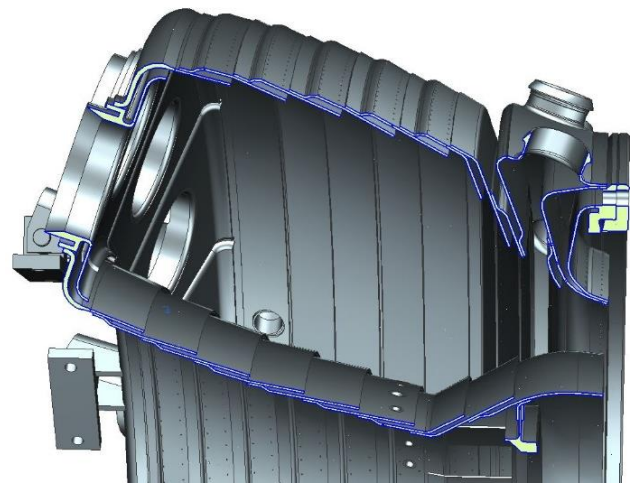
مطابق با شکل ۸، سوخت و هوا به ترتیب از ابتدای برنر و شکاف‌های قسمت مخروطی وارد شده و اختلاط بین آن‌ها رخ می‌دهد تا جریان یکنواختی در ورودی لاینر شکل گیرد. دمای درون لاینر به علت فرآیند احتراق به مراتب بالاتر از دمای برنر می‌باشد که بیشینه این دما در ناحیه بازچرخش اصلی رخ می‌دهد؛ زیرا جریانی از عناصر شیمیایی فعال و گرما به سمت پایه شعله ایجاد خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تأثیر دو ردیف سوراخ‌های خنک‌کاری لاینر با توجه به توزیع دمای جریان نزدیک دیواره مشهود است.

تحلیل اجزاء محدود محفظه احتراق نسل سوم IGT25

به دلیل وجود تقارن در هندسه چرخشی، یک هجدهم از کل محفظه احتراق نسل سوم که شامل یک برنر می‌باشد، شبیه‌سازی شد. در وهله اول، شبکه‌بندی مدل هندسی محفظه احتراق با انتخاب نوع المان مناسب در نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود. المان‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شود تا با یک شبکه‌بندی دقیق، تمام جزئیات هندسی محفظه شامل لاینر که دارای ابعادی در مقیاس متر تا سوراخ‌های خنک‌کاری با مقیاس میلی‌متر را لحاظ کند و با کمترین تعداد المان ممکن، به زمان حل بهینه‌ای منتج شود. المان‌ها از نوع درجه دوم و مکعبی^۲ بوده و در راستای ضخامت دو المان در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های مدل هندسی محفظه احتراق ۱۰۲۲۲۴ است. در شکل ۹ نمایی از شبکه‌بندی محفظه احتراق نسل سوم IGT25 مشاهده می‌شود. با توجه به شرایط کارکرد محفظه و حل CFD، میدان جریان احتراق به‌دست‌آمده و با استفاده از خروجی این تحلیل که ضریب انتقال حرارت سیال در جداره فلز می‌باشد، شرایط مرزی دمایی به مدل المان محدود اعمال می‌شود. بدین ترتیب میدان دمایی برای فلز محفظه احتراق به دست می‌آید. در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ توزیع دمای بی‌بعد اعمال شده به محفظه احتراق برحسب درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه دما در محفظه احتراق نسل سوم IGT25 در هیت شیلد می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی جابه‌جایی و همچنین استفاده از نتایج تحلیل دمایی به‌عنوان ورودی تحلیل استاتیکی، تحلیل تنش با در نظر گرفتن اثر خزش انجام می‌شود.

محفظه احتراق نسل سوم افزایش پیدا کرده است. سوراخ‌های رقیق‌سازی جریان کمک می‌کند تا پروفیل دمای خروجی محفظه به صورت یکنواخت باشد. لذا با رقیق‌سازی جریان، آسیب‌های احتمالی ناشی از برخورد گاز داغ به قطعات پیش روی آن در توربین کاهش پیدا می‌کند. نمایی از ردیف سوراخ‌های رقیق‌سازی در انتهای لاینر در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

از دیگر موارد مهم در ارتقاء عمر محفظه احتراق، نوع اتصال برنرها به لاینر است. با توجه به آسیب‌های مشاهده شده، در اتصال برنر به لاینر که از نوع جوش است احتمال رشد ترک بالا است. این نوع اتصال در مواردی نیز منجر به شکست قطعه شده است. در این اتصال که از نوع دائم می‌باشد، امکان دست‌رسی به برنرها برای بازبینی و تعمیرات بدون جداسازی قطعات موتور ممکن نیست. با ایجاد اتصال غیر دائم در محفظه احتراق نسل سوم IGT25، دست‌رسی به هر برنر برای بازدید، تعمیرات و تعویض آن تسهیل شده است. تغییر دیگری که در راستای افزایش عمر صورت گرفته است، استفاده از سگمنت‌های جداگانه برای هر برنر به جای صفحه یک پارچه می‌باشد. صفحه اتصال مجزای هر برنر به لاینر در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در این حالت از ایجاد تنش‌های فشاری بین صفحات جلوگیری شده است.



شکل ۷: هندسه لاینر محفظه احتراق نسل سوم موتور IGT25

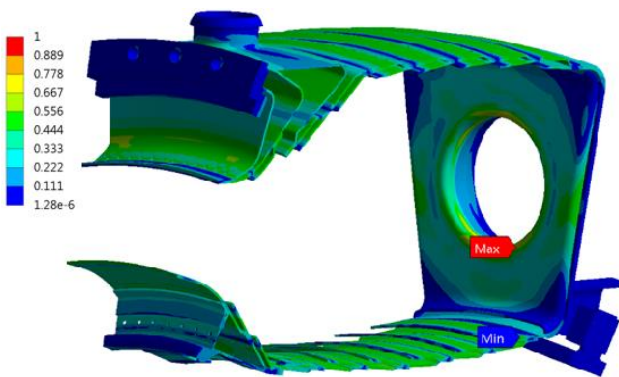
شبیه‌سازی میدان جریان

با توجه به اینکه جریان درون برنر و لاینر چرخشی متقارن است، تنها یک هجدهم از هندسه کلی شبیه‌سازی شد. برای انجام شبیه‌سازی جریان، ابتدا به شبکه‌بندی میدان حل پرداخته شده است. پس از تولید هندسه و انجام ساده‌سازی‌های لازم بر روی هندسه‌های مورد نظر، شبکه‌بندی ANSYS Meshing انجام شد. تعداد المان‌های این قسمت در مجموع ۱۷۴۶۹۰۰۸ المان می‌باشد. همچنین سطوح کناری با شرط مرزی پرودیک^۱ اعمال شده است. پس از صحت‌سنجی مدل‌های انتخابی و اطمینان از کیفیت شبکه‌بندی پیاده‌سازی شده روی هندسه، شبیه‌سازی جریان احتراقی درون محفظه انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی جریان در قالب توزیع دما، کانتور سرعت و شکل شعله قابل ارائه است. در شکل ۸، دمای جریان درون برنر و لاینر در مقطع میانی مشاهده می‌شود. دماها نسبت به دمای بیشینه بی‌بعد شده‌اند. بیشینه جریان در ناحیه بازچرخش اصلی رخ داده است.

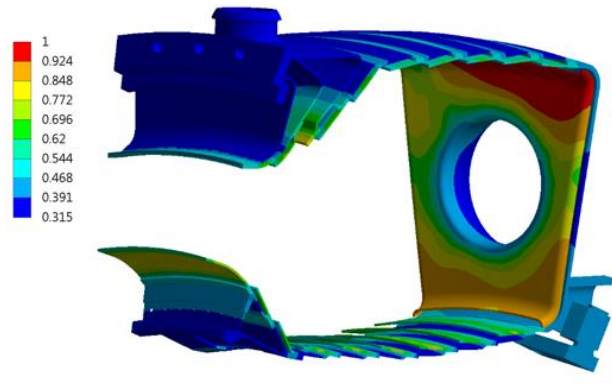
تحلیل تنش با در نظر گرفتن معادله ساختاری خزشی برای یک بازه زمانی مشخص انجام می‌شود. در این پژوهش، تغییر شکل غیر الاستیک خزشی مواد که وابسته به زمان نیز می‌باشد، با مدل نورتون توصیف شده است. با تعیین خواص فیزیکی، مکانیکی و خزشی نورتون مواد به کاررفته در محفظه احتراق، تحلیل خزشی برای مدت زمان ۴۰ هزار ساعت کارکرد موتور در بار کامل انجام می‌شود. در شکل ۱۲، محل تنش بیشینه لحظه ابتدایی به دلیل بار حرارتی در قسمت هیت شیلد محفظه احتراق می‌باشد. در شکل ۱۳ توزیع تنش بی‌بعد شده محفظه احتراق پس از ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد به واسطه آزاد سازی تنش^۲، نشان داده شده است. تنش نسبت به تنش بیشینه قطعه بی‌بعد شده است. همچنین در شکل ۱۴، مقدار بیشینه کرنش خزشی پس از ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد برابر با یک درصد می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، محل بیشینه کرنش خزشی در قسمت هیت شیلد اتفاق افتاده است.



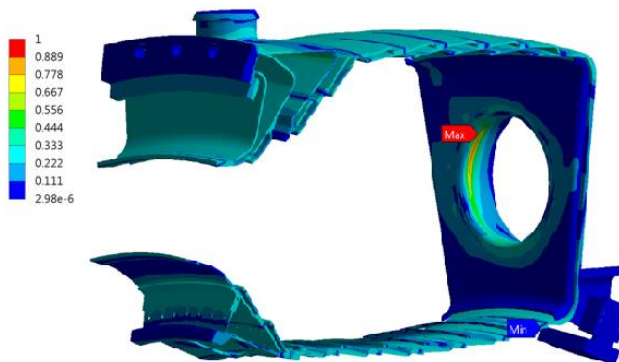
شکل ۹: نمایی از شبکه‌بندی محفظه احتراق نسل سوم IGT25



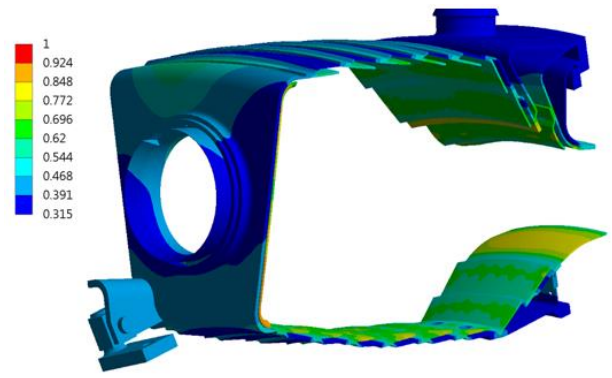
شکل ۱۲: توزیع تنش محفظه احتراق در ثانیه اول



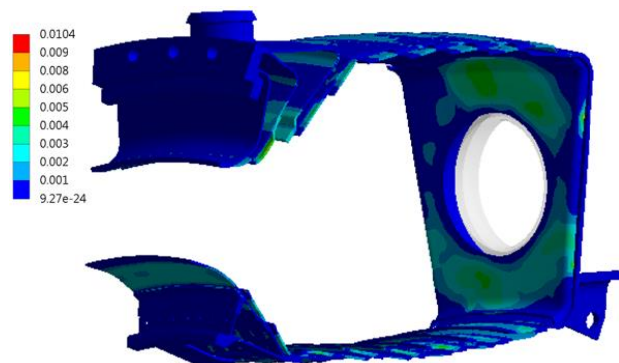
شکل ۱۰: توزیع دمای محفظه احتراق



شکل ۱۳: توزیع تنش محفظه احتراق نسل سوم پس از ۴۰۰۰۰ ساعت



شکل ۱۱: توزیع دمای محفظه احتراق از نمایی دیگر



شکل ۱۴: توزیع کرنش خزشی محفظه احتراق پس از ۴۰۰۰۰ ساعت

تحلیل تنش بر مبنای روابط بنیادی خزش^۱

رفتار خزشی یک نمونه نسبت به زمان شامل سه مرحله است. در مرحله اول نرخ کرنش خزشی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. مرحله دوم دارای نرخ کرنش خزشی ثابت است و بیشترین زمان را به خود اختصاص می‌دهد. در مرحله سوم نیز آسیب‌ها و تغییرات جدی در ساختار ماده رخ می‌دهد و در نهایت شکست اتفاق می‌افتد. لذا در بیشتر موارد منحنی ناحیه دوم (پایا) مورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه نورتون^۲ نیز برای پیش‌بینی نرخ کرنش خزشی مرحله دوم مطابق با (۱) توسعه پیدا کرده است [۴].

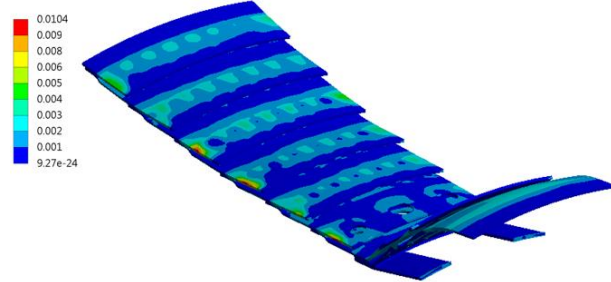
$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-\frac{Q_c}{RT}} \quad (1)$$

³ Relaxation

¹ Finite Element Analysis on the Creep Constitutive Equation

² Norton

شدید دمایی روی صفحه اتصال دهنده برنر به لاینر نیز می شود. تغییرات ایجاد شده در سیستم خنک کاری هم با ایجاد فیلم نازک و پیوسته ای از هوای خنک روی دیواره لاینر، گرادیان های دمایی روی دیواره فلز را کاهش می دهد. کاهش دمای فلز، شدت آسیب ها کاهش داده و منجر به افزایش طول عمر خزشی می شود. با لحاظ کردن تمامی این تمهیدات در طراحی محفظه احتراق نسل سوم IGT25، عملکرد کلی آن بهبود چشمگیری نسبت به محفظه احتراق IGT25 پیدا کرده است. اشتعال پایدار و کاهش گرادیان های دمایی همچنین افزایش طول عمر قطعات را در پی خواهد داشت.



شکل ۱۵: توزیع کرنش خزشی لاینر محفظه احتراق پس از ۴۰۰۰۰ ساعت

بحث بر روی نتایج

به طور معمول برای تعیین آسیب خزشی قطعه تحت بارگذاری ترمومکانیکال از تئوری جمع آسیب خطی رابینسون استفاده می شود. در روش رابینسون، نسبت زمانی که قطعه تحت بارگذاری های متفاوت قرار می گیرد، به زمان شکست آن قطعه تحت همان بارگذاری محاسبه می شود. مجموع این نسبت های زمانی در تمام گام های بارگذاری، مقدار آسیب یا خرابی نهایی قطعه را نتیجه می دهد [۵]. طبق رابطه رابینسون، هنگامی که مجموع خرابی در یک نقطه به مقدار ۱ برسد، شکست اتفاق می افتد. محاسبه مقدار آسیب خزشی به کمک نتایج تحلیل تنش در قالب کد APDL انسیس پیاده سازی شده است. در گزارش های اخیر شرکت زیمنس در زمینه تخمین عمر خزشی موتورهای توربین گاز، روش رابینسون از دیدگاه کرنش خزشی بحرانی برای محاسبه آسیب خزشی مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق با (2)، در این دیدگاه، محاسبه خرابی به صورت نسبت کرنش لحظه ای قطعه به کرنش بحرانی آن انجام می شود.

$$D_i = \frac{\varepsilon_i(T_i, \sigma_i)}{\varepsilon_{Ci}(T_i, \sigma_i)} \quad (2)$$

زیمنس بر اساس تست هایی که بر روی نمونه های بخش های گرم موتور انجام داده است، بازه ۱،۲ تا ۱،۷ درصد را برای مقدار کرنش خزشی بحرانی گزارش کرده است [۶]. همان طور که اشاره شد، مقدار بیشینه کرنش خزشی محفظه احتراق نسل سوم IGT25 پس از عملکرد ۴۰۰۰۰ ساعت که در شکل ۱۴ ارائه شده است برابر با ۱ درصد است. با استفاده از قانون رابینسون با معیار کرنش خزشی بحرانی زیمنس می توان نتیجه گرفت مجموع آسیب خزشی تا زمان ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد موتور کمتر از یک است. لذا مجموع آسیب محفظه احتراق تا ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد آن به حد بحرانی نرسیده است. در نتیجه زمان اولین دوره بازرسی و تعمیرات محفظه احتراق نسل سوم IGT25 در محاسبات اولیه بیشتر از ۴۰۰۰۰ ساعت تخمین زده می شود. با توجه به اینکه زمان اولین دوره تعمیرات محفظه احتراق توربین گاز IGT25 بعد از کارکرد موتور در مدت زمان کمتری می باشد [۱]، افزایش عمر خزشی در محفظه احتراق نسل جدید IGT25 صورت گرفته است.

نتیجه گیری

در این مقاله راهکارهایی برای ارتقاء محفظه احتراق IGT25 در راستای افزایش عمر، بهبود در عملکرد موتور و کاهش سطح تولید آلاینده ها ارائه شد. این راهکارها به صورت کلی شامل تعویض برنر، تغییر در سیستم خنک کاری و نوع اتصالات است. با تعویض برنر و جایگزین کردن برنر DLE نسل سوم، محفظه احتراق با کاهش سطح تولید آلاینده ها در حالت کارکرد موتور با سوخت مایع عملکرد بهتری دارد. طراحی ناحیه ای اختلاط برای برنر نسل سوم در کنار کمک به اشتعال کامل موجب کاهش گرادیان های

مراجع و منابع

- 1- Soroudi, M.A., Yazdani, M., Abedini, M., and Khaledi, H. (2014). National Iranian Gas Turbine Combustion System Technology Development and Localization. International Comprehensive Competition Conference on Engineering Sciences in Iran.
- 2- Gauthier, P. Q. (2017, June). Comparison of temperature fields and emissions predictions using both an FGM combustion model, with detailed chemistry, and a simple eddy dissipation combustion model with simple global chemistry. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 50855, p. V04BT04A068). American Society of Mechanical Engineers.
- 3- Welch, M. (2014, October). Gas Turbine Power Generation Utilizing Low and Variable Quality Gas Fuels in Dry Low Emissions Combustion Systems. In SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- 4- Norton, F. H. (1929). The creep of steel at high temperatures (No. 35). McGraw-Hill Book Company, Incorporated.
- 5- Robinson, E.L. (1938). Effect of temperature variation on the creep strength of steels. Trans. ASME, vol. 160, p. 253-259.
- 6- Wan, E., Hong, C., Dewey, R., Bernstein, H. L., & Norsworthy, D. A. (2003). Life management system for advanced F class gas turbines: Siemens-Westinghouse W501FC first stage blade analysis and transition piece durability. *Technical Review of Siemens*.