

ارزیابی تأثیر مدل‌های محاسبه زمان شکست در تخمین عمر خزشی محفظه احتراق موتور V94.2

سیده فاطمه موسوی^{۱*}، مهدی بقایی^۲، رضا گلستانی^۳، محمدعلی سرودی^۴، هیوا خالدی^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، r.golestani@turbotec-co.com

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

^۵ کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، مدیر عامل، شرکت توربوتک، تهران، h.khaledi@turbotec-co.com

* نویسنده مخاطب

چکیده

توربین گاز V94.2 از پرکاربردترین توربین‌های مورد استفاده در بخش تولید برق کشور است. در این پژوهش ابتدا به معرفی مختصر و شناسایی محفظه احتراق این موتور پرداخته شده است. با توجه به اینکه خزش از پدیده‌های تعیین‌کننده در عمر این محفظه احتراق است، در ادامه به بررسی فرایند تخمین عمر خزشی پرداخته شده است. یکی از مراحل مهم تخمین عمر در آسیب خزشی، پیش‌بینی زمان شکست قطعه به ازای تنش و دمای هر نقطه از آن است. لذا در این پژوهش ابتدا شبیه‌سازی جریان و تحلیل تنش با در نظر گیری اثر خزش محفظه احتراق به ترتیب در نرم‌افزارهای فلونت و انسیس انجام شده است. سپس به بررسی دو روش پرکاربرد پارامتر لارسون-میلر و شربی-دورن برای محاسبه زمان شکست خزشی پرداخته شده است. تابع پارامترهای مذکور بر حسب تنش برای ماده IN617 که قطعات اصلی محفظه احتراق از آن ساخته شده‌اند، به کمک داده‌های تجربی خزش استخراج شده است. مجموع آسیب خزشی پس از ۴۰ هزار ساعت کارکرد محفظه احتراق در بار کامل با دو روش لارسون-میلر و شربی دورن محاسبه شده است. از نواحی بحرانی آسیب خزشی تشخیص داده شده، گره‌های بحرانی محدودکننده عمر محفظه احتراق با هر دو روش مذکور استخراج شد. نتایج نشان می‌دهد انتخاب روش پیش‌بینی زمان شکست نقش مهمی در تشخیص ناحیه بحرانی آسیب خزشی و تخمین عمر دارد.

کلمات کلیدی: عمر خزشی، محفظه احتراق توربین گاز V94.2، پارامتر زمان-دما

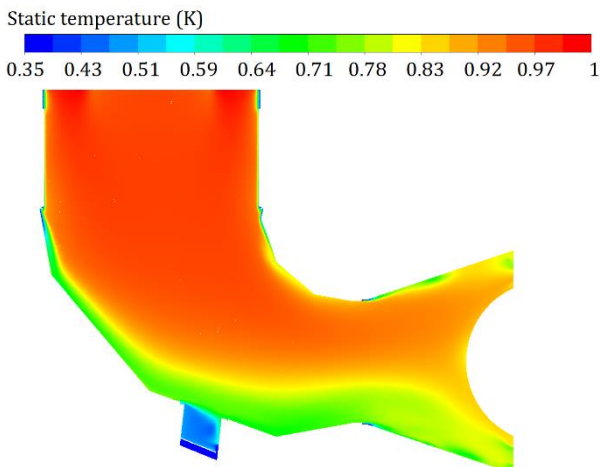
مقدمه

توربین گاز V94.2 یکی از توربین‌های گازی با قابلیت کارکرد در شرایط دشوار محسوب می‌شود که در نیروگاه‌های حرارتی برای به حرکت درآوردن ژنراتورها، استفاده می‌شود. شکل سیلویی محفظه احتراق این سری از توربین‌های گازی زمینس، آن‌ها را نسبت به مابقی محصولات این کمپانی منحصر به فرد نموده است. قابلیت دسترسی، اطمینان بالا از عملکرد و همچنین هزینه کم در مقابل توان تولیدی زیاد، از مهم‌ترین ویژگی‌های اقتصادی این نوع توربین گاز می‌باشد [۱]. این موتور که هم به‌صورت سیکل ساده و هم به‌صورت سیکل ترکیبی استفاده می‌شود، یکی از پرکاربردترین توربین‌های گاز مورد استفاده در بخش تولید برق کشور می‌باشد. از این‌رو افزایش دانش تعمیر و نگهداری، تحلیل عملکرد موتور، بومی کردن سیستم مدرن بهره‌برداری، افزایش توان و تخمین عمر در این توربین‌های گازی پرکاربرد، امری ضروری تلقی می‌شود. بسیاری از قطعات توربین گاز در شرایط دما بالا کار می‌کنند. عملکرد بخش‌های داغ موتور از جمله محفظه احتراق در دمای بالا، می‌تواند منجر به فعال شدن پدیده‌های آسیب‌رسان به قطعات شود. خزش، خستگی، سایش [۲] و خوردگی از مهم‌ترین پدیده‌های مخرب

⁵ Sherby- Dorn
⁶ Manson- Haferd
⁷ Manson- Brown

¹ Time- Temperature Parameter
² Monkman- Grant
³ Wilshire
⁴ Larson- Miller

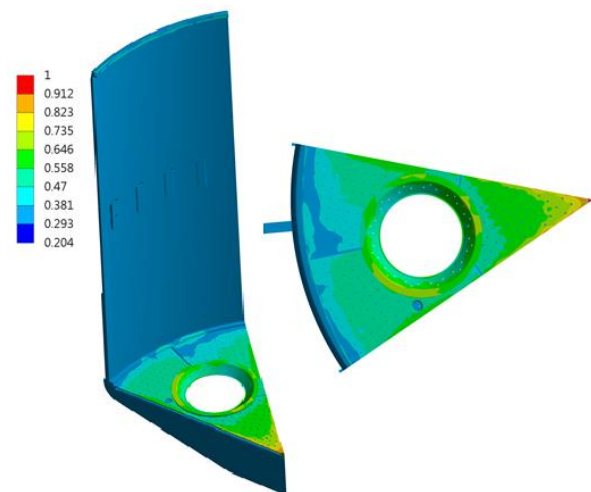
شکل ۲، تأثیر جریان خنک‌کاری در نواحی نزدیک دیواره مشاهده می‌شود. در ادامه دمای جریان بخش‌های میکسینگ چمبر و اینترکسیسینگ مشاهده می‌شود. این دو بخش ضمن ایجاد اختلاط مناسب، وظیفه هدایت جریان گازهای داغ خروجی را از فلیم تیوب به سمت پره‌های ردیف اول توربین به عهده دارند [۷].



شکل ۶: توزیع دما در صفحه میانی برای دامنه کلی حل در محفظه احتراق V94.2

حل اجزاء محدود

تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود. برای ایجاد مدل اجزاء محدود مسئله، ابتدا مدل‌های هندسی قطعات اصلی فلیم تیوب، میکسینگ چمبر و اینترکسیسینگ شبکه‌بندی شده و سپس شرایط مرزی مکانیکی روی آن‌ها اعمال می‌گردد. شبکه‌بندی مدل‌ها توسط المان مکعبی^۴ و از مرتبه دوم^۵ صورت گرفته است. تعداد المان‌های فلیم تیوب، میکسینگ چمبر و اینترکسیسینگ به ترتیب برابر ۱۵۲، ۴۷۰ و ۱۸۵ هزار المان است. با استفاده از نتایج حل CFD، میدان دمایی به عنوان بار وارد شده برای فلز محفظه احتراق به دست آمده است. در شکل ۳، ۴ و شکل ۵ به ترتیب توزیع دمای بی بعد اعمال شده به قطعات فلیم تیوب، میکسینگ چمبر و اینترکسیسینگ محفظه احتراق نشان داده شده است. مقادیر دمایی هر قطعه نسبت به دمای بیشینه آن بی بعد شده‌اند.

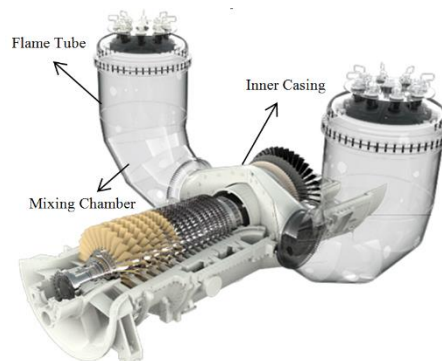


شکل ۳: میدان دمای بی‌بعد در فلیم تیوب

لارسون-میلر و شربی-دورن کاربرد وسیعی دارند. در این پژوهش به بررسی تأثیر دو مدل لارسون-میلر و شربی-دورن در پیش‌بینی زمان شکست پرداخته می‌شود. با مقایسه نتایج آسیب تجمعی حاصل از این دو مدل پس از ۴۰۰۰۰ ساعت از عملکرد موتور، نتیجه تخمین عمر خزشی محفظه احتراق V94.2 ارائه می‌گردد.

معرفی موتور V94.2

توربین گاز V94.2 از دو محفظه احتراق عمودی که به صورت U-شکل در اطراف موتور نصب شده‌اند، تشکیل می‌شود. این آرایش غیرمحوری و جدای محفظه احتراق از کل موتور، به منظور حداقل سازی افت فشار جریان گذرنده از توربین در نظر گرفته شده است [۱]. نمایی کلی از محفظه احتراق در اطراف موتور به همراه بخش‌های اصلی آن در شکل ۱، قابل مشاهده است. هر محفظه احتراق از سه بخش اصلی فلیم تیوب^۱، میکسینگ چمبر^۲ و اینترکسیسینگ^۳ تشکیل شده است. محفظه احتراق موتور توربین گاز V94.2 از آلیاژهای مختلفی از جمله 15Mo3، IN617 و Incoloy800 ساخته شده است، اما بخش اعظم آن از جنس IN617 می‌باشد.



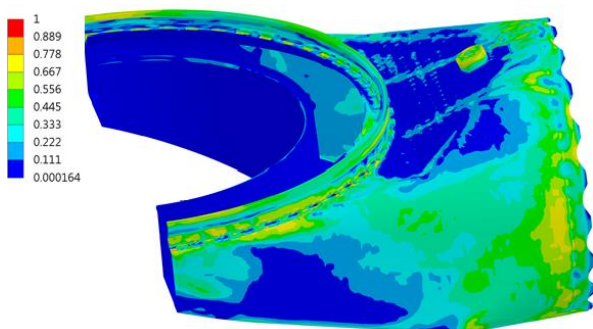
شکل ۱: توربین گاز V94.2

شبیه‌سازی جریان

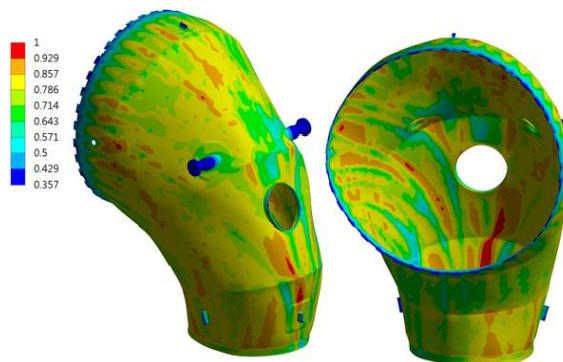
برای انجام شبیه‌سازی جریان، ابتدا به شبکه‌بندی میدان حل پرداخته شده است. پس از تولید هندسه و انجام ساده‌سازی‌های لازم بر روی هندسه‌های مورد نظر، شبکه‌بندی ANSYS Meshing انجام شده است. از آنجا که پیچیدگی هندسی محفظه قابل توجه است. برای سهولت از روش شبکه‌بندی غیرساختار یافته استفاده شده است. همچنین برای اعمال لایه مرزی از ۱۴ لایه با ضخامت لایه اولیه ۰.۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. پس از صحت سنجی مدل‌های انتخابی و اطمینان از کیفیت شبکه‌بندی پیاده‌سازی شده روی هندسه، شبیه‌سازی جریان احتراقی درون محفظه انجام می‌شود. به دلیل گستردگی ابعاد هندسی این محفظه احتراق، ناحیه حل جریان به چند قسمت تقسیم شده است. جریان خروجی از دیفیوزر در سه بخش اینترکسیسینگ، میکسینگ چمبر و فلیم تیوب به صورت جداگانه شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از حل ناحیه سرد به صورت شرایط مرزی در ورودی حل ناحیه گرم اعمال شده است. میدان حل ناحیه گرم نیز با توجه به ابعاد هندسی و محدودیت سخت‌افزاری به دو قسمت تقسیم شده است. بخش اول مربوط به ابتدای فلیم تیوب و بخش دوم شامل مابقی نواحی گرم محفظه احتراق است. در شکل ۲، دمای بی‌بعد شده جریان بخش دوم حل مشاهده می‌شود. دماها نسبت به دمای بیشینه‌ی جریان بی‌بعد شده‌اند. مطابق با

⁴ Hex
⁵ Quadratic

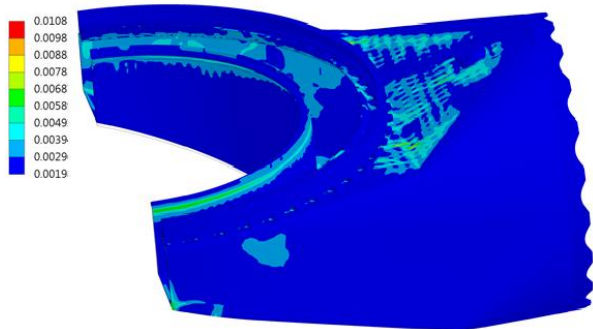
¹ Flame Tube
² Mixing Chamber
³ Inner Casing



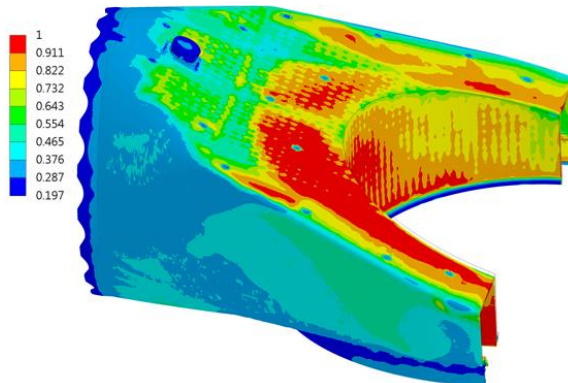
شکل ۶: تنش بی بعد در اینرکسیسینگ پس از ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد



شکل ۴: میدان دمای بی بعد در میکسیسینگ چمبر



شکل ۷: کرنش خزشی در اینرکسیسینگ پس از ۴۰۰۰۰ ساعت کارکرد



شکل ۵: میدان دمای بی بعد در اینرکسیسینگ

پیش‌بینی زمان شکست

پس از تحلیل تنش با استفاده از روابط بنیادی خزش، پیش‌بینی زمان شکست با استفاده از روش‌های زمان-دما انجام می‌شود. پارامترهای زمان-دما برای برقراری رابطه بین دما و زمان شکست با سطح‌های مختلف تنش به وجود آمدند. صورت کلی این پارامترها را می‌توان به صورتی که در رابطه (۲) آمده‌است، بیان نمود.

$$P(T, t) = G(\sigma) \quad (2)$$

طبق رابطه (۲)، پارامتر $P(T, t)$ یک رابطه تحلیلی شامل دما (T) و زمان شکست (t) است که به ازای هر ترکیبی از این دو متغیر در یک سطح تنش، مقدار ثابتی از پارامتر مربوطه که منجر به شکست می‌شود را تخمین می‌زند. برای بیان ارتباط این پارامتر با تنش تابع $G(\sigma)$ تابع تعریف می‌شود و ارتباط پارامتر را با سطح‌های مختلف تنش برقرار می‌کند. پارامتر لارسون-میلر به صورت رابطه (۳) تعریف شده است [۴]:

$$LMP = T(C + \log t) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، C ثابت ماده و T دمای مطلق با یکای کلوین است. t نیز بیانگر زمان است و با یکای ساعت در رابطه‌ی مذکور گزارش می‌شود. نکته‌ی حائز اهمیت این است که مقدار C در تحلیل کل داده‌های تجربی یک مقدار یکتا فرض می‌شود. لذا مقدار آن در میزان دقیق بودن برون‌یابی زمان شکست در بلندمدت تأثیر دارد. به همین دلیل با تحلیل رگرسیون داده‌ها می‌توان بهترین مقدار C را به دست آورد. با ترکیب رابطه (۲) و رابطه (۳)، پارامتر لارسون-میلر به صورت تابعی از تنش قابل استخراج است. با برازش منحنی بر داده‌های تجربی تنش، دما و زمان شکست (σ, T, t_R) می‌توان پارامتر لارسون-میلر را بر حسب چندجمله‌ای از لگاریتم تنش به دست آورد [۶]. لذا رابطه کلی پارامتر لارسون-میلر متشکل از سه متغیر تنش، دما و زمان را می‌توان به صورت رابطه (۴) ارائه کرد. در رابطه (۴) تنش برحسب

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 رابطه (۱) توسعه پیدا کرده است [۸].

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

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 شده است. با بررسی نتایج تحلیل تنش و توزیع دمای روی دیواره در قطعات محفظه احتراق مشاهده شد، قطعه اینرکسیسینگ یکی از بخش‌های بحرانی محفظه احتراق است. لذا در این پژوهش نتایج تحلیل تنش و آسیب خزشی این قطعه ارائه می‌شود. تنش بی بعد با در نظر گیری اثر خزش در قطعه اینرکسیسینگ بعد از ۴۰ هزار ساعت کارکرد در شکل ۶ مشاهده می‌شود. تغییرات تنش به واسطه پدیده خزش و آزادسازی تنش است. مقادیر تنش نسبت به مقدار بیشینه بی بعد شده‌اند. همچنین نتایج کرنش خزشی مطابق با شکل ۷ به دست آمده است.

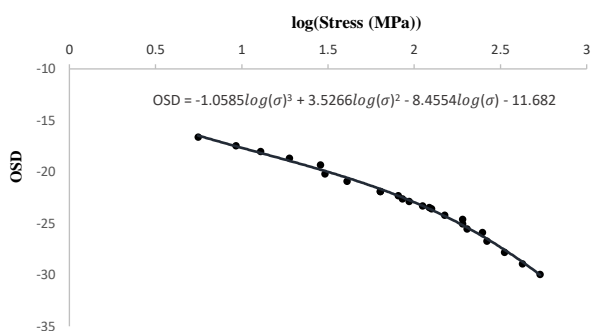
² Norton

¹ Finite Element Analysis on the Creep Constitutive Equation

با انجام تحلیل رگرسیون خطی روی نتایج لارسون میلر و مقادیر تنش متناسب با آن، مقدار بهینه‌ی ثابت ماده در لارسون- میلر به صورت $C = 19.3$ به دست می‌آید. با برازش منحنی بر داده‌های نمودار شکل ۹ تابع پارامتر لارسون- میلر بر حسب تنش به دست آمده است. با جاگذاری تابع لارسون- میلر بر حسب تنش در رابطه (۶) می‌توان زمان شکست را محاسبه نمود.

$$t_R = 10^{\frac{LMP}{T} - C} \quad (6)$$

محاسبه ثوابت روش شربی- دورن نیز مطابق با روند روش لارسون- میلر می‌باشد. در شکل ۱۰، داده‌های پارامتر شربی- دورن بر حسب تنش در دماهای مختلف ارائه شده است. با برازش منحنی بر داده‌ها، تابع پارامتر شربی- دورن بر حسب تنش استخراج شده است.



شکل ۱۰: منحنی OSD بر حسب تنش برای آلیاژ IN617

مقدار بهینه $\frac{Q}{2.3R}$ با انجام رگرسیون خطی روی نتایج برابر با ۲۸۲۰۰ محاسبه شده است. با استفاده از تابع پارامتر شربی- دورن در شکل ۱۰، زمان شکست به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$t_R = 10^{OSD + \frac{Q}{2.3RT}} \quad (7)$$

بحث بر روی نتایج

تخمین عمر خزشی با تعیین میزان آسیب خزشی قطعات با استفاده از نتایج تحلیل تنش، انجام می‌شود. محاسبه مقدار آسیب خزشی در قالب کد APDL انسیس پیاده‌سازی شده است. به طور معمول برای تعیین آسیب خزشی قطعه تحت بارگذاری ترمومکانیکال^۱ از قانون رایبسنسون^۲ استفاده می‌شود. در روش رایبسنسون، نسبت زمان بارگذاری قطعه به زمان شکست آن تحت همان بارگذاری محاسبه می‌شود. مطابق با رابطه (۸)، مجموع این نسبت‌های زمانی در تمام گام‌های بارگذاری، مقدار آسیب نهایی قطعه را نتیجه می‌دهد. لازم به ذکر است زمان شکست (t_R) با استفاده از رابطه (۶) و رابطه (۷) با توجه به تنش مؤثر قطعه (σ_i) و دما (T_i) تعیین می‌گردد.

$$D = \sum_i \frac{t_i(T_i, \sigma_i)}{t_{R_i}(T_i, \sigma_i)} \quad (8)$$

طبق رابطه رایبسنسون، هنگامی که مجموع خرابی در یک نقطه به مقدار یک برسد، شکست اتفاق می‌افتد [۹]. در این پژوهش، مجموع آسیب خزشی با دو روش پارامتر لارسون- میلر و پارامتر شربی- دورن محاسبه می‌شود. با نتایج آسیب‌های محاسبه شده به ازای روش‌های لارسون- میلر و شربی- دورن می‌توان به مقایسه اثر به‌کارگیری روش‌های مختلف محاسبه زمان شکست خزشی در تخمین عمر خزش پرداخت. نتایج آسیب خزشی قطعه اینترکیسینگ محفظه احتراق تا ۴۰۰۰۰ هزار ساعت با هر دو روش مذکور

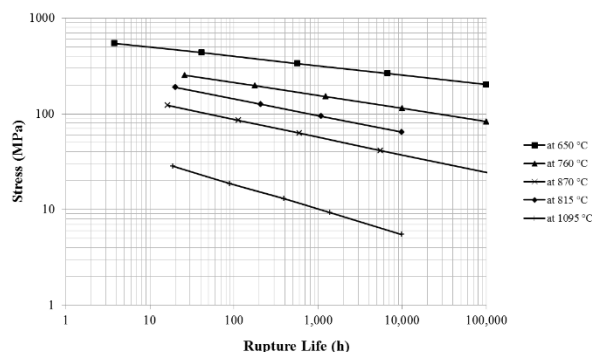
مگا پاسکال است. ضرایب ثابت a_0 و a_1 نیز با برازش منحنی پارامتر لارسون- میلر بر حسب لگاریتم تنش بر روی داده‌های تست خزشی به دست می‌آید.

$$LMP = a_0 + a_1 \log(\sigma) \quad (4)$$

دومین پارامتر زمان- دما مدنظر در این پژوهش، پارامتر شربی- دورن است. رابطه شربی- دورن به صورت رابطه (۵) است [۵]:

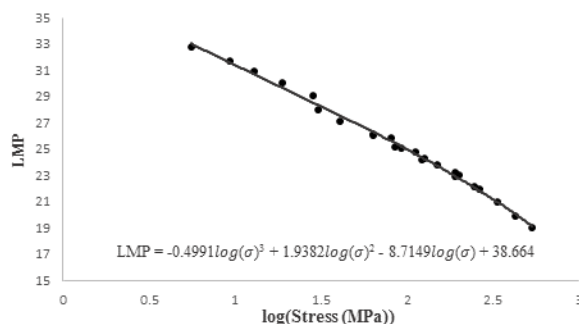
$$OSD = \log t - \frac{Q}{2.3RT} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، R ثابت جهانی گاز و Q انرژی فعال‌سازی خزش است. همان‌طور که قبل‌تر به اهمیت مقدار ثابت C رابطه لارسون- میلر در تعیین زمان شکست اشاره شد، مقدار انرژی فعال‌سازی نیز در رابطه شربی- دورن دارای همان سطح از اهمیت است. لذا مطابق با روند محاسبه مقدار بهینه C در رابطه لارسون- میلر، می‌توان مقدار بهینه انرژی فعال‌سازی خزشی برای ماده را در رابطه شربی- دورن به دست آورد. همان‌طور که اشاره شد بخش‌های بحرانی قطعات مختلف محفظه احتراق توربین گاز V94.2 از آلیاژ IN617 ساخته شده است. لذا برای تخمین عمر خزشی محفظه احتراق لازم است با استفاده از داده‌های تجربی، خواص خزشی آلیاژ IN617 محاسبه شود. در این پژوهش از داده‌های تست شکست خزشی IN617 در دماهای ۶۵۰، ۷۶۰، ۸۱۵، ۸۷۰ و ۱۰۹۵ درجه سانتی‌گراد مطابق با شکل ۸ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص می‌باشد نتایج زمان شکست برای هر سطح از تنش در دمای ثابت گزارش شده است.



شکل ۸: استحکام گسیختگی ورق آئیل انحلالی آلیاژ IN617 در دماهای مختلف

همان‌طور که اشاره شد، با استفاده از داده‌های تجربی تنش، دما و زمان شکست برای ماده IN617 و رسم نمودار می‌توان رابطه بین داده‌های پارامتر زمان- دما و تنش را برای این ماده به دست آورد. داده‌های پارامتر لارسون- میلر بر حسب تنش در دماهای مختلف مطابق با رابطه (۳) به دست آمده و در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: منحنی LMP بر حسب تنش برای آلیاژ IN617

² Robinson Rule

¹ Thermomechanical

پیش‌بینی زمان شکست در تعیین مجموع آسیب قطعه تأثیر دارد. همچنین انتخاب روش پیش‌بینی زمان شکست نقش مهمی در تشخیص ناحیه بحرانی آسیب خزشی دارد. در نتیجه برای تخمین عمر، اتکا به یک روش مشخص قابل استناد نیست. بنابراین پیشنهاد می‌شود با روش‌های مختلف به محاسبه آسیب قطعه پرداخته شود. در نهایت با توجه به مشاهدات میدانی و پارامترهای نقطه طراحی توربین گاز می‌توان روش مناسب را برگزید. لازم به ذکر است با تغییر هر کدام از پارامترهای جنس قطعه، شرایط دما، تنش و بارگذاری موتور نتایج آسیب متفاوت خواهد بود. لذا به تأثیر پارامترهای مذکور در گزینش روش مناسب پیش‌بینی زمان شکست نیز باید دقت کرد.

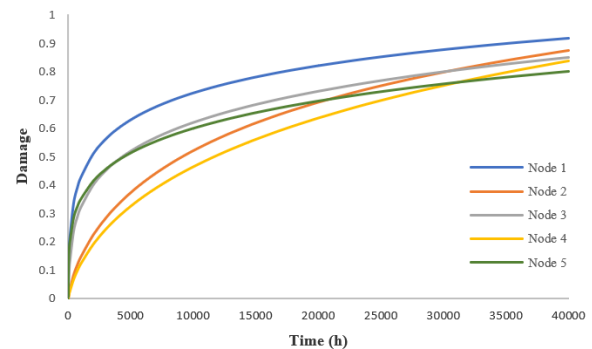
فهرست علائم

$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش خزشی، $1/s$
σ	تنش، MPa
T	دما، K
t_R	زمان شکست، h
Q_c	انرژی فعال‌سازی خزش، J/mol
R	ثابت جهانی گازها، $J/mol.K$
C_1	ضریب نورتون، $1/s.(Pa)^{C_2}$
C_2	توان تنش نورتون
LMP	پارامتر لارسون- میلر، $K.log(h)$
OSD	پارامتر شربی- دورن، $log(h)$
D	آسیب قطعه

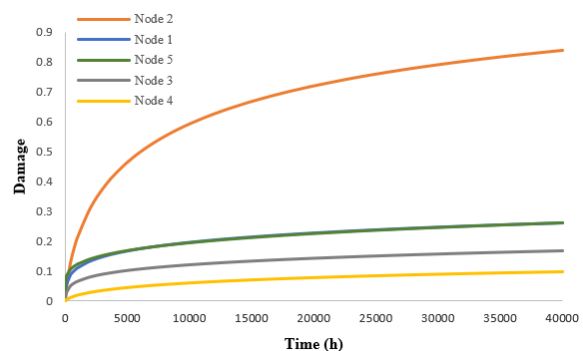
مراجع

- SIEMENS AG, 2011. The SGT-2000E series- designed for reliable, robust, and flexible power generation.
- بقایی، مهدی و گلستانی ثانی، رضا و موسوی، سیده فاطمه و سرودی، محمدعلی و علیزاده، محمد، ۱۴۰۰. بررسی تجربی آسیب سایشی محفظه احتراق توربین گاز V94.2. بیست و نهمین همایش سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و هشتمین همایش صنعت نیروگاه های حرارتی، تهران.
- Heimerl, G.J., 1954. *Time-temperature parameters and an application to rupture and creep of aluminum alloys* (No. NACA-TN-3195).
- Larson, F.R., 1952. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses. *Trans. ASME*, 74, pp.765-775.
- Orr, R.L., Sherby, O.D. and Dorn, J.E., 1953. *Correlations of rupture data for metals at elevated temperatures* (No. NP-4765; Technical Report 27). Institute of Engineering Research, Univ. of Calif., Berkeley.
- Swaminathan, V.P. and Lowden, P., 1989. *Gas turbine blade life assessment and repair guide* (No. EPRI-GS-6544). Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Southwest Research Inst., San Antonio, TX (USA); Liburdi Engineering Ltd., Hamilton, ON (Canada).
- ثانی، سینا و احدی، عبدالله و صفری، ناعمه و محمدی، میلاد و سرودی، محمدعلی و علیزاده، محمد، ۱۴۰۰. شبیه‌سازی عددی جریان واکنشی در محفظه احتراق موتور V94.2 و بررسی اثر احتراق آشفته در پایداری شعله، کنفرانس سوخت و احتراق ایران، شیراز (در حال چاپ).
- Norton, F.H., 1929. *The creep of steel at high temperatures* (No. 35). McGraw-Hill Book Company, Incorporated.
- Robinson, E.L., 1938. Effect of temperature variation on the creep strength of steels. *Trans. ASME*, 60, pp.253-259.

برای پنج نقطه اول ناحیه‌های بحرانی، ارائه شده است. نتایج مجموع آسیب خزشی بیشینه در قطعه اینرکیسینگ پس از ۴۰۰۰۰ ساعت با روش‌های لارسون- میلر و شربی- دورن به ترتیب ۹۱ درصد و ۸۴ درصد است. با بررسی موقعیت المان‌های بحرانی آسیب در هندسه قطعه مشاهده شد که ناحیه بحرانی آسیب با هر دو روش یکسان تشخیص داده شده است. با این وجود ترتیب نقاط بحرانی آسیب در دو روش متفاوت است. تفاوت در تشخیص نقاط بحرانی بر اساس شماره گره‌ها در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱: تغییرات آسیب خزشی با روش لارسون- میلر برای گره‌های بحرانی اینرکیسینگ



شکل ۱۲: تغییرات آسیب خزشی با روش شربی- دورن برای گره‌های بحرانی اینرکیسینگ

با توجه به شکل ۱۱ و شکل ۱۲، بازه‌ی آسیب محاسبه شده برای نقاط بحرانی با روش شربی- دورن دارای سطح پایین‌تری نسبت به روش لارسون- میلر است. لذا انتخاب روش محاسبه زمان شکست تأثیر جدی در تعیین آسیب خزشی دارد. به همین دلیل تعیین محدوده عمر با استفاده از نقاط بحرانی آسیب وابسته به روش پیش‌بینی زمان شکست است.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی جریان و تحلیل تنش محفظه احتراق موتور V94.2 با در نظر گرفتن رابطه بنیادی خزشی، رابطه نورتون، به ازای ۴۰۰۰۰ ساعت از کارکرد موتور در بار کامل انجام شد. سپس آسیب خزشی با استفاده از پارامترهای لارسون- میلر و شربی- دورن، برای شرایط دما و تنش در هر نقطه از محفظه احتراق محاسبه گردید. ناحیه بحرانی آسیب از نتایج هر دو روش محاسبه زمان شکست با در نظرگیری شرایط دما، تنش و کرنش خزشی تعیین شد. با بررسی این نواحی، گره‌های بیشینه آسیب هر قطعه، به ازای نتایج هر دو روش انتخاب گردید. تخمین عمر خزشی بر اساس رفتار آسیب گره بحرانی بر حسب زمان انجام شد. نتایج نشانگر آن بود که روش انتخابی برای