

تخمین عمر خزش-خستگی محور توربین موتور توربوفن

احمد هادی زاده اصفهانی^۱، مهدی صفا^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ahmad.hadizadeh@aut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، md_safa@yahoo.com

*نویسنده مخاطب

چکیده

موتورهای توربینی یکی از اصلی ترین ارکان تولید انرژی هستند که در حوزه هوافضا به عنوان یکی از مهمترین مولفه های تولید رانش بکار می روند. تعیین زمان بازرسی و تعویض قطعات موتورهای توربینی همواره از چالش های پیش روی طراحان این سیستم ها بوده است. محور توربین ها در این نوع موتورها که عموماً تحت تأثیر دمای بسیار بالا، تنش های حرارتی و مکانیکی زیادی هستند از جمله قسمت های حساس می باشند که کمتر مورد توجه قرار گرفته اند. معمولاً زمان های بازرسی در توربین ها وابستگی زیادی به عمر این قطعات دارد. مودهای متالورژیکی خرابی مانند انواع اکسیداسیون، سایش و خوردگی عموماً باعث شروع خرابی و ایجاد ترک می شوند اما مودهای مکانیکی خرابی مانند خزش و انواع خستگی اعم از خستگی های کم چرخه، پرچرخه و حرارتی از جمله پدیده های مخرب هستند که بخش عمده خرابی نهایی این قطعات را ایجاد می کنند. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مقاله با بررسی خرابی های ناشی از خستگی پرچرخه، خزش و اندرکنش خزش و خستگی به تخمین عمر این قطعات پرداخته شده است. در این بررسی، از سوپرآلیاژ INCOLOY 901، به علت مقاومت مناسب نسبت به دما، به عنوان ماده اصلی استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از روش تنش-عمر برای خستگی پرچرخه و روش لارسون-میلر جهت خزش در تخمین عمر قطعات نتایج قابل قبولی ارائه می دهد.

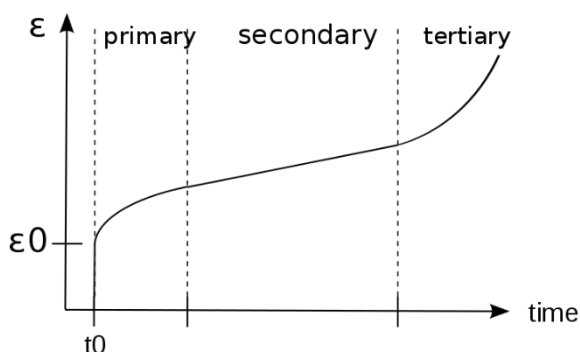
واژه های کلیدی: محور توربین - خزش - خستگی - عمر - عمر خزش خستگی - تخمین عمر

پژوهش با اتخاذ روشی مناسب به تعیین عمر مفید قطعات که تحت اندرکنش خزش و خستگی هستند، پرداخته شده است.

۱-۱- خزش

بطور کلی خزش تابعی پیچیده از تنش، زمان، دما، اندازه و شکل دانه، ریزساختار، کسر حجمی ذرات و تحرک نایجایی ها و ... می باشد. با افزایش دما امکان تغییر فاز ماده وجود دارد. ممکن است با تغییر فاز ماده شبکه کریستالی ماده تغییر شکل بدهد که این امر موجب ایجاد تنش درونی در ساختار کریستالی می گردد. همچنین ممکن است با افزایش دما رسوبات موجود در فاز زمینه در فلز زمینه حل شود؛ همین امر باعث می شود رسوب مورد نظر که به عنوان مثال برای افزایش استحکام ماده مورد نظر و با اندازه رسوب خاصی اضافه شده است، دیگر کاربردی برای افزایش استحکام ماده نداشته باشد. این امر حتی می تواند با تغییر اندازه رسوب موجب کاهش استحکام ماده مورد نظر نیز گردد.

خزش به طور معمول دارای سه مرحله است، در مرحله اول ابتدا شیب زیاد است و سپس کم می شود. یعنی نرخ کرنش با گذشت زمان کاهش پیدا می کند. در مرحله دوم نرخ کرنش ثابت می شود و نمودار به صورت تقریباً خطی می شود. در مرحله سوم نیز به دلیل کاهش چشمگیر سطح مقطع جسم و گلوئی شدن، تنش در مقطع جسم به طرز قابل توجهی افزایش یافته و در نتیجه نرخ کرنش (شیب نمودار) افزایش می یابد تا این که شکست در جسم ایجاد می شود. سه مرحله بالا در نمودار کرنش بر حسب زمان در یک نمونه تحت بار ثابت را نشان می دهد. [۱]



شکل ۱: نمودار کرنش-زمان یک جسم تحت تأثیر خزش و مراحل خزش

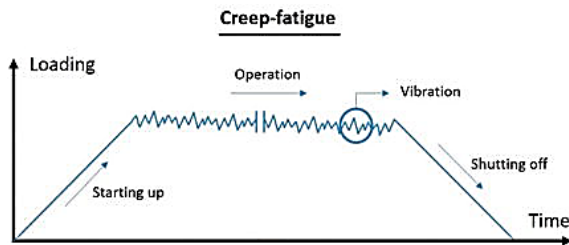
برای نمونه های تحت بار محوری کششی ثابت، یک رابطه یکتا همواره بین تنش، زمان شکست و دما وجود دارد.

$$C(\sigma, t_r, T) = \text{Constant} \quad (1)$$

۱- مقدمه

افزایش دمای کارکرد و راندمان بالاتر در موتورهای توربینی امری ضروری می باشد. بهبود خواص مواد در جهت کارکرد در دمای بالا نیاز اساسی این هدف است. با توجه به محدودیت های روش های آزمایشگاهی در بررسی خواص مواد و هزینه بالای این روش ها، توجه به روش های عددی، اهمیت چشمگیری می یابد. به همین دلیل با ایجاد شکل صحیحی از روش های عددی به تعیین عمر مفید محور توربین پرداخته شده است. با توجه به دمای کارکرد و شکل بارگذاری وارده بر این قطعات، عموماً از آلیاژهای مقاوم به درجه حرارت نظیر آلیاژهای پایه نیکل استفاده می شود. سوپرآلیاژ پایه نیکل INCOLOY 901 معمولاً به عنوان ماده ساختاری در محور توربین در توربین های گازی مورد استفاده قرار می گیرد. عموماً خرابی های ناشی از خزش و خستگی عامل پایان یافتن عمر این قطعات می باشند. پس در این

با توجه به محدوده گذر در تغییرات دمایی زیاد وجود پدیده خستگی بر کسی پوشیده نیست. از سوی دیگر به دلیل وجود دمای بالا، خرابی‌های ناشی از خزش همواره از عوامل اصلی شکست قطعات محسوب می‌شوند. به همین دلیل بررسی پدیده‌هایی که تحت بارگذاری خزش-خستگی هستند، امری ضروری محسوب می‌شود. در اینجا به ارائه تئوری جمع خرابی برای اندرکنش خزش-خستگی می‌پردازیم.



شکل ۲: نمودار تجمیع خرابی‌های خزش-خستگی

۱-۴-۱ مدل جمع خرابی

مدل جمع خطی خرابی به عنوان ساده‌ترین روش در تحلیل پدیده‌هایی که تحت اندرکنش خزش و خستگی هستند، مطرح می‌شود. در این مدل جزئیات ریزساختارهای خرابی در نظر گرفته نمی‌شود. شکل رابطه به صورت زیر است [۴]:

$$D_{fatigue} + D_{creep} = D_{total} \quad (3)$$

در این رابطه D_{total} معرف مجموع خرابی، D_{creep} معرف خرابی ناشی از خزش و $D_{fatigue}$ معرف خرابی ناشی از خستگی می‌باشد. در این مدل، شکست زمانی رخ می‌دهد که جمع خرابی‌های ناشی از خزش و خستگی به یک مقدار بحرانی برسد. طبق رابطه ماینر برای خرابی ناشی از خستگی و رابینسون برای خرابی ناشی از خزش و با تکرار رابطه بالا در یک سیکل رابطه (۳) به صورت زیر خواهد بود:

$$\sum \left(\frac{N(\sigma)}{N_f} + \frac{t_i}{t_r(\sigma)} \right) = D_{total} \quad (4)$$

که t_i زمان هر سیکل و $N(\sigma)$ سیکل‌های تنش محاسبه شده از مدل است. اگر مقدار تنش برای تمام سیکل‌ها برابر نبود. رابطه (۴) به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$\sum \frac{N(\sigma)}{N_f} + \sum \frac{t_i}{t_r(\sigma_i)} = D_{total} \quad (5)$$

۲- خواص مواد

خواص ماده INCOLOY 901 از چند مرجع مختلف بررسی شده تا صحت سنجی مناسبی صورت گیرد. [۵]

جدول ۱: درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ مورد استفاده

Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Al	Fe	C
۴۲.۵	۱۸	۱	۶	۲.۷	۰.۳۵	۳۶.۲	۰.۱

در سیستم نامگذاری استاندارد UNS آمریکا، آلیاژ مورد استفاده با عنوان N09901 شناخته می‌شود که خواص آن در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲: خواص فیزیکی آلیاژ مورد استفاده

Density (Kg/m ³)	Specific Heat (J/Kg. K)	Thermal Conductivity (W/m. K)	Thermal Coefficient (*10e-6)
۸۱۴۰	۴۳۱	۱۳.۵	۱۵.۳

حالت‌های مختلفی از رابطه وجود دارد که یکی از آن حالات پارامتر لارسون میلر است. این رابطه یکی از روشهای مفید در فهم و درک رفتارهای خزشی مواد گوناگون می‌باشد. این روش به توجیه منطقی تأثیرات زمان-دما در تنش-گسیختگی در تست‌های خزش می‌پردازد. پارامتر لارسون میلر به صورت زیر معرفی می‌شود. [۲]

$$LMP = T \times 10^{-3} (C + \log t_r) \quad (2)$$

C به عنوان یک ثابت که وابسته به ماده انتخابی می‌باشد. برای اکثر مواد این مقدار بسیار نزدیک به ۲۰ می‌باشد. t_r زمان گسیختگی و T دما برحسب کلونین است.

به علت اینکه قطعه مورد بحث در این پروژه، سیکل‌های کاری کوتاه مدتی دارد، عملاً واره‌ی تنش چندانی رخ نداده و فرض می‌شود تنش استاتیکی تا آخر سیکل به قوت خود باقی است. لذا استفاده از رابطه لارسون میلر توجیه می‌یابد.

۱-۲-۱ خستگی

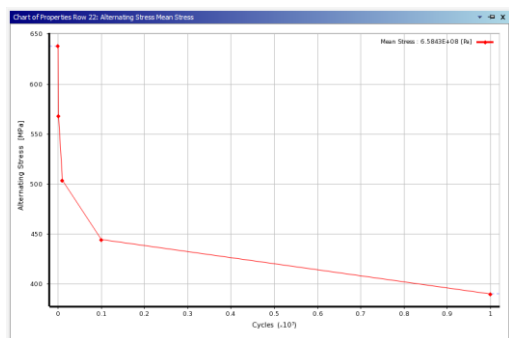
خرابی‌های ناشی از خستگی عموماً در تنش‌هایی بسیار کمتر از تنش حد تحمل قطعه روی می‌دهد. خستگی در مواد بر اثر بارگذاری و باربرداری صورت می‌گیرد. شکل سازه به شکل قابل توجهی بر عمر خستگی سازه تأثیرگذار است، امکان رشد ترک در بارگذاری متناوب عموماً در گوشه‌های تیز و یا سوراخ‌های مربعی، مکان‌هایی که تنش محلی افزایش می‌یابد، سریع‌تر روی می‌دهد.

عمر خستگی که با نماد N_f نشان داده می‌شود بیان‌گر تعداد سیکل‌های تنشی است که جسم مورد آزمایش، تا قبل از اینکه شکست نهایی رخ دهد طی می‌کند. در بعضی از مواد مانند فولاد و تیتانیوم، تنش حد خستگی برای ماده تعریف می‌شود. در صورت اعمال تنش کمتر از این مقدار، آن ماده در هر تعداد سیکل، دچار شکست نخواهد شد. به این مقدار تنش، تنش حد خستگی یا استحکام خستگی می‌گویند. البته غالب آلیاژها (به جز فولادها) فاقد حد دوام بوده و معمولاً در صنعت هوایی تنش نظیر ۱۰ میلیون سیکل را به عنوان تنش معیار در نظر می‌گیرند.

روش‌های طراحی خستگی با وجود تشابه‌های فراوان، دارای تفاوت‌هایی نیز هستند. علت این تفاوت‌ها به خاطر این است که یک قطعه، سازه و یا وسیله نقلیه ممکن است از نظر ایمنی بحرانی یا غیر بحرانی باشد و از طرفی واماندگی‌ها ممکن است تنها مایه رنجش و یا فاجعه‌آمیز باشند. ارزیابی میزان کاربرد و موفقیت محصول نیز بخشی از روند طراحی خستگی است. انتخاب مدل عمر خستگی، یک تصمیم مهم در طراحی است. در حال حاضر چهار مدل متداول برای مهندسان طراح وجود دارد که از میان آنها مدل‌های تنش-عمر برای خستگی پرچرخه و مدل‌های کرنش-عمر برای خستگی کم چرخه مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۳]

۱-۳-۱ اندرکنش خزش-خستگی و تأثیر آن بر کاهش عمر قطعات

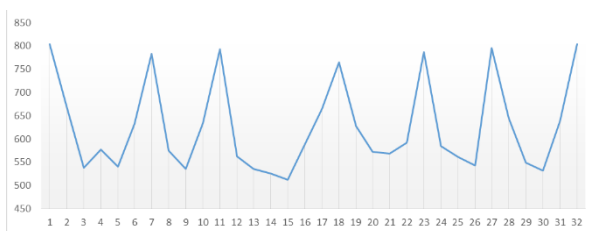
پدیده‌های خزش و خستگی خود به تنهایی از مباحث چالش برانگیز در صنعت محسوب می‌شوند، حال اگر دو پدیده خزش و خستگی به صورت همزمان بر روی قطعه‌ای تحمیل شوند، بررسی و پیش‌بینی نحوه پاسخ سیستم بسیار مشکل خواهد بود. قطعات زیادی در توربین‌های صنعتی، هواپیماهای مافوق صوت و بسیاری دیگر از ماشین‌های صنعتی تحت اثر پدیده خزش و خستگی به صورت همزمان می‌باشند.



شکل ۴: نمودار تنش-عمر خطی اصلاح شده INCOLOY 901

۳-۳- اثر تنش میانگین

برای محاسبه تنش میانگین باید یک گره را در یک دور چرخش روتور در نظر گرفت تا پس از بررسی کمترین و بیشترین تنش، تنش میانگین را که یک پارامتر اساسی برای معیار خستگی است محاسبه نمود.



شکل ۵: تغییرات تنش یک گره در یک دور چرخش

همانطور که مشاهده می شود در هر دور محور، ۶ سیکل اتفاق می افتد و تنش میانگین (σ_m) ۶۵۸.۴۳ MPa است.

۳-۴- معیار سودربرگ

با توجه به محتاط بودن این معیار، انتخاب مناسبی برای قطعات حساس مانند محور توربین است. از این رابطه جهت تعیین دامنه تنش معادل ناشی از تنش متوسط و تنش متغیر در هر نقطه استفاده می شود که این معیار به شکل زیر است [۸]:

$$\frac{\sigma_a}{S_{f(equ)}} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \quad (9)$$

σ_a تنش متناوب و S_y تنش تسلیم است.

۳-۵- پارامتر لارسون میلر جهت تخمین عمر خزشی

پارامتر لارسون-میلر برای موادی که در دمای بالا و تحت تنش به مدت طولانی قرار می گیرند با شرط پایداری ریز ساختار ماده قابل استفاده است. یکی از موارد تعیین کننده پایداری ریزساختاری مواد، تعیین نسبت t/t_p می باشد. در این رابطه t_f و t_r به ترتیب مبین زمان گسیختگی خزشی و زمان ماندگاری است. پس استفاده از این روش در تعیین مقدار خزش خالص حتی در دهامای خیلی بالا نیز، روشی به نسبت درست محسوب می شود [۹]. نمودار لارسون-میلر بر حسب تنش مورد استفاده در این پژوهش به شکل ۶ است. در این نمودار تنش بر حسب MPa و دما بر حسب کلونین و زمان شکست بر حسب ساعت می باشد.

جدول ۳: خواص مکانیکی آلیاژ مورد استفاده

Temperature(°C)	۲۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۷۰۰
Yield Strength (MPa)	۹۲۷	۸۷۶	۸۵۵	۸۴۰	۸۴۰	۸۳۶	۸۳۳
Ultimate Strength (MPa)	۱۲۱۰	۱۱۹۰	۱۱۶۰	۱۱۲۰	۱۰۹۰	۱۰۳۰	۹۶۰
Young Modulus (GPa)	۲۰۱	۱۹۸	۱۹۲	۱۷۹	۱۷۲	۱۶۶	۱۵۹
Tensile Elongation (%)	۱۵.۸	-	-	۱۶.۶۵	۱۶.۱۵	۱۳.۵	۱۳.۱
Rupture Strength (MPa)	-	-	-	-	۶۸۹	۵۱۷	۲۲۸

۳- روابط و محاسبات

جهت محاسبه و تخمین عمر قطعه پس از بررسی تنش ها و با توجه به اینکه محور تحت بارگذاری های موجود در ناحیه پلاستیک قرار نمی گیرد، روابط برای خستگی پرچرخه، خزش و اندرکنش بین آنها بکار گرفته می شود.

۳-۱- نمودار تنش-عمر (S-N)

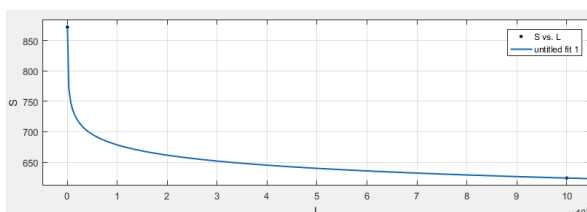
برای محاسبه خستگی پرچرخه، نمودار تنش-عمر در سوپر آلیاژ مورد نظر با استفاده از ۲ نقطه به طور تقریبی و با استفاده از نرم افزار MATLAB، و به روش Curve Fit محاسبه شده است.

از مرجع [۶] تنش معیار (S_m) در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد را برای عمر 10^7 برابر با ۶۲۴ MPa است، اما نقطه اولیه یعنی برای عمر 10^3 از رابطه زیر محاسبه می شود [۷]:

$$S_m = S_{10^3 cycle} = f S_{ut} \quad (6)$$

که برای استحکام نهایی کششی (S_{ut}) ۱۰۹۰ MPa، ضریب f برابر با ۰.۸ می باشد. بنابراین تنش خستگی (S_f) از رابطه (۷) بدست می آید؛

$$S_f = 1121 * N^{-0.0363} \quad (7)$$



شکل ۳: نمودار تنش عمر INCOLOY 901

۳-۲- ضرایب تصحیح حد دوام نمودار تنش-عمر

جهت افزایش دقت محاسبات از ضرایب تصحیح اندازه (k_d) ، بارگذاری (k_l) و دما (k_T) استفاده می شود. [۸]

جدول ۴: مقدار ضرایب تصحیح حد دوام

مقدار	ضریب
۰.۷۴	k_d
۱	k_l
۰.۸۴۵	k_T

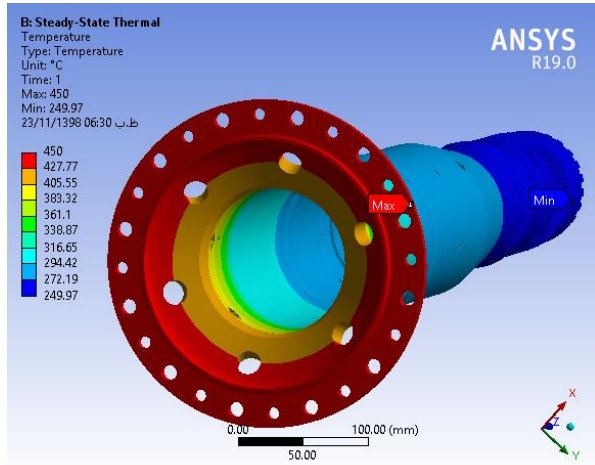
بنابراین برای معادله تنش-عمر اصلاح شده داریم؛

$$S_f = 1121 * N^{-0.0363} - 234 \quad (8)$$

در نتیجه نمودار تنش-عمر اصلاح شده، به شکل زیر رسم خواهد شد؛

۲-۴- گرادیان دما

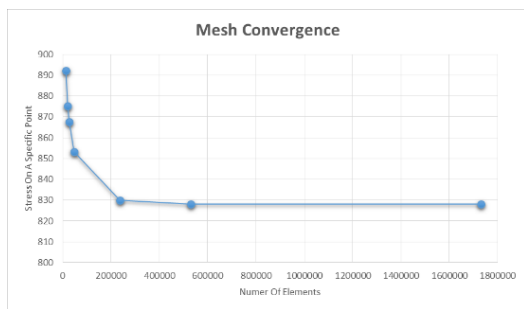
دما موجود در ابتدای محور (اتصال کمپرسور) ۲۵۰ درجه، در محل یاتاقان اول (نزدیک به توربین) ۳۰۰ درجه و در محل توربین ۴۵۰ درجه سانتی گراد می باشد.



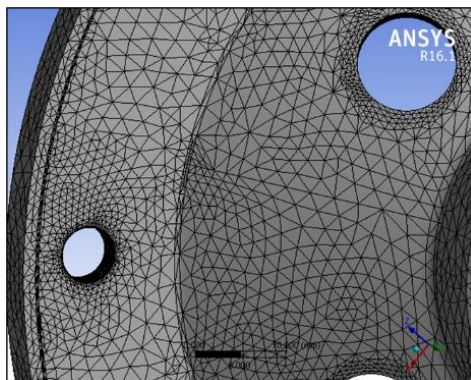
شکل ۸: گرادیان دما اعمالی به مدل

۳-۴- صحت سنجی مدل محاسباتی

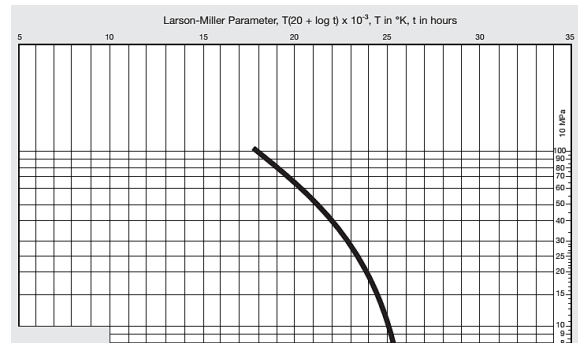
این مهم در دو مرحله صورت گرفته است. مرحله اول مطالعه مش و مرحله دوم در تعادل بودن نیروهای تکیه گاهی با وزن روتور. در روش اول با کوچک کردن اندازه المان ها و در واقع افزایش تعداد آنها همگرایی پاسخ بررسی شده است. با محاسبه عکس العمل ناشی از شتاب گرانش، نیروی بدست آمده از سمت تکیه گاه ها با نیروی وزن برابری می کند، بنابراین این موضوع تصدیقی بر محاسبات عددی نرم افزار خواهد بود. [۱۱]



شکل ۹: صحت سنجی بوسیله همگرایی مش



شکل ۱۰: مش بندی بهینه



شکل ۶: نمودار تنش بر حسب پارامتر لارسون-میلر در سوپراآلیز [۱۰] INCOLOY 901

۶-۳- اندرکنش خزش-خستگی

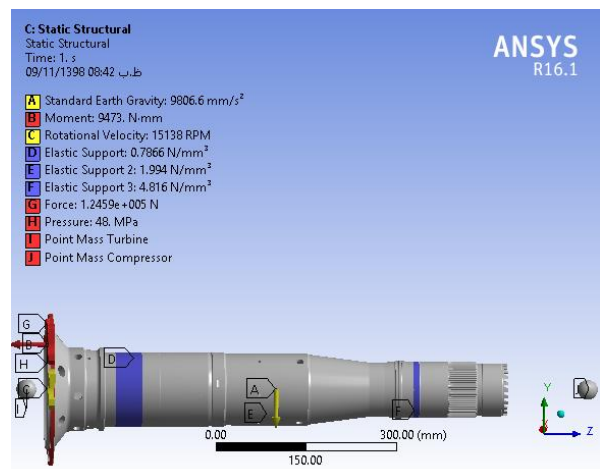
در نهایت برای تخمین عمر نهایی حاصل از اندرکنش خزش-خستگی از جمع آثار خرابی از رابطه (۵) استفاده می گردد.

۴- شبیه سازی

جهت تخمین عمر محاسباتی موضوع مورد بحث، روش اجزا محدود (FEM) در نرم افزار ANSYS بکار گرفته شده و محاسبات استحکام صورت می پذیرد.

۱-۴- شرایط تکیه گاهی و نیرویی

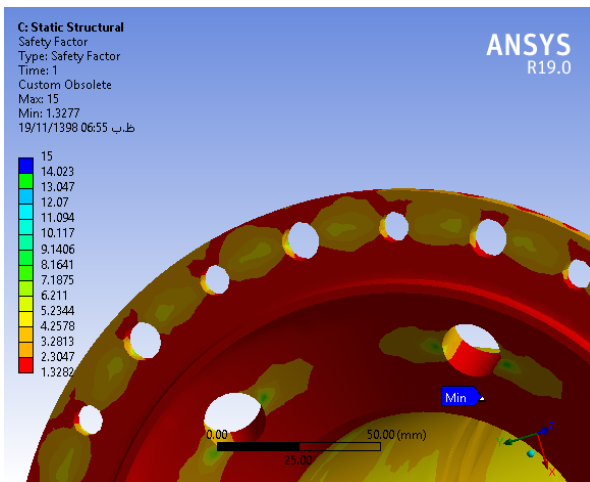
انتقال قدرت از محور پر فشار به قطعه دیسک کمپرسور با یک هزار خار انجام می گیرد. گشتاور وارده بر شفت ۹۴۷۳ N.m، تراست محوری وارده بر شفت ۱۲۴.۵۹۰ KN در نظر گرفته شده است. شتاب ۱ g به محور وارد می شود. سرعت های دورانی ۱۵۱۳۸ RPM در محور، ۰.۵ Rad/s و ۰.۳ Rad/s در راستای عمود بر محور در نظر گرفته شده است. جهت جلوگیری از ایجاد حرکت در راستای افقی، جابجایی در سمت کمپرسور صفر در نظر گرفته شده است. بر اساس مدل دوبعدی موجود، جهت تعیین مشخصات جرمی از مجموعه های دوار کمپرسور و توربین پر فشار، مدل های سه بعدی ساده سازی شده از هر یک ایجاد شده است. برای در نظر گرفتن اثرات توربین و مجموعه کمپرسور پر فشار، دو جرم متمرکز با وزن و ممان اینرسی معادل بر روی شفت پر فشار در نظر گرفته شده است.



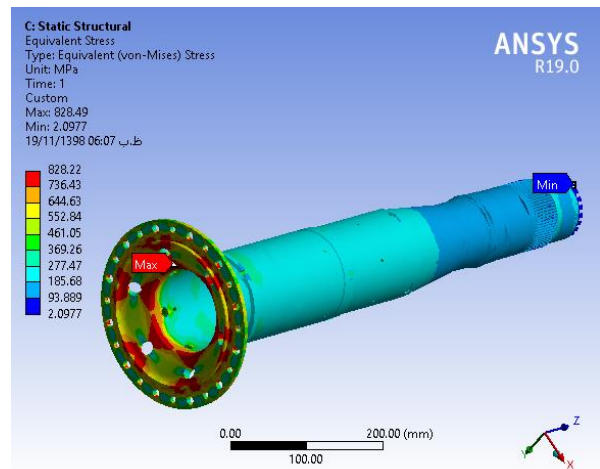
شکل ۷: شرایط مرزی اعمال شده به مدل

۴-۴- نتایج

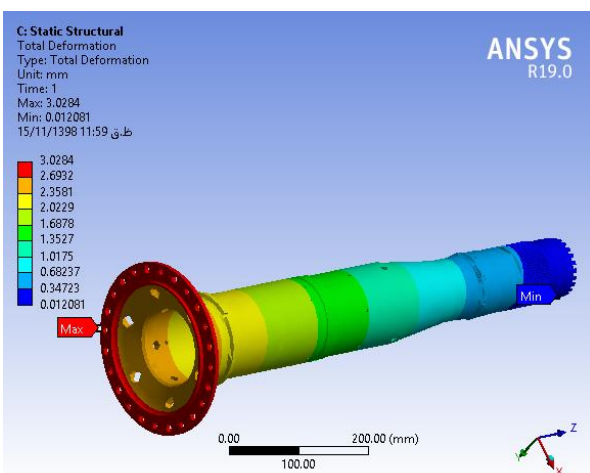
در این قسمت نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس را بررسی می گردد. ابتدا در خصوص تنش معادل فون-میسس و در نهایت تخمین عمر خستگی، خزش و تداخل بین آنها مشاهده می شود.



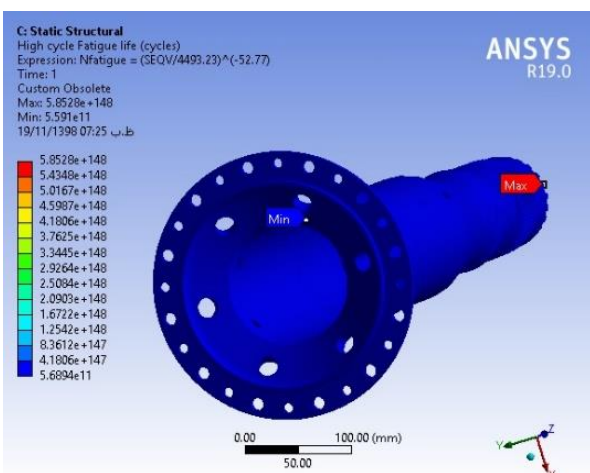
شکل ۱۳: ضریب ایمنی بر اساس استحکام نهایی



شکل ۱۱: تنش معادل قطعه با معیار فون میسز

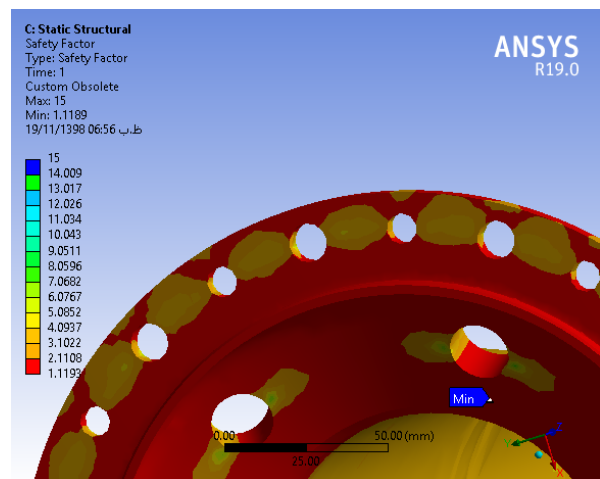


شکل ۱۴: کرنش کلی روتور



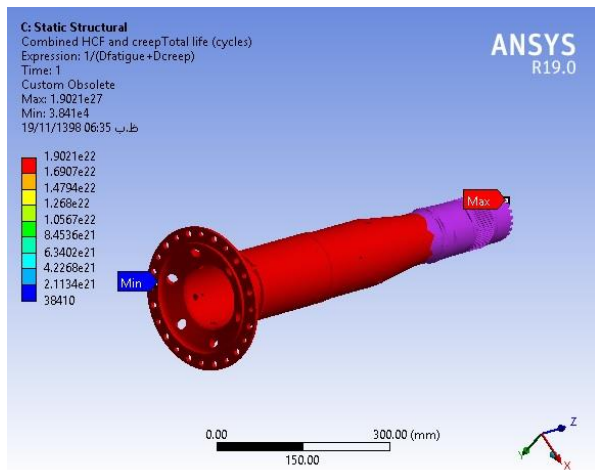
شکل ۱۵: تخمین عمر خستگی پرچرخه (معیار سودربرگ)

با توجه به تنش های حاصله و معیار عمر خستگی، محور بی نهایت فیزیکی را داراست.

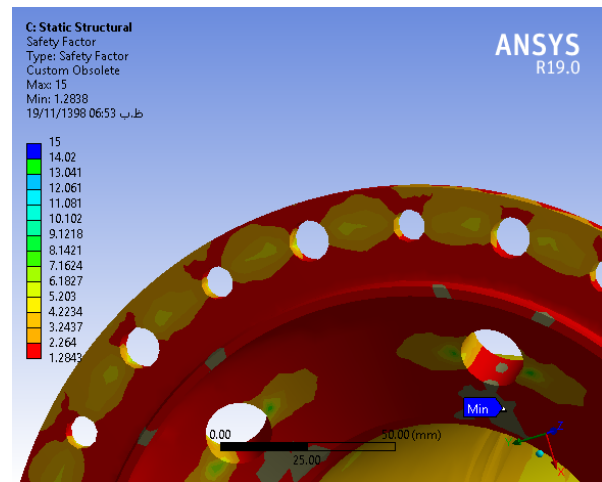


شکل ۱۲: ضریب ایمنی بر اساس تنش تسلیم

از قبل نیز قابل پیش بینی است که ضریب ایمنی بر اساس استحکام نهایی مقدار حداقلی بالاتری نسبت به حالت تنش تسلیم داشته باشد. مشاهده می گردد که ضریب ایمنی در نواحی سوراخ دار کمترین مقدار را داراست.



شکل ۱۸: عمر خزش-خستگی



شکل ۱۶: ضریب ایمنی تخمین عمر خستگی پرچرخه

۵- نتیجه گیری

با توجه به نیاز صنعت هواضا و با توجه به اهمیت تعیین عمر قطعات در این موتورها، در این پژوهش، پژوهشگر توجه خود را معطوف به تعیین عمر محور توربین که تحت بارگذاری اندرکنش خزش-خستگی پرچرخه می‌باشند، کرده است. در این پژوهش تخمین عمر محور به کمک روش المان محدود صورت پذیرفت.

با توجه به مطالب ارائه شده، ماده INCOLOY 901 به عنوان ماده هدف در این پژوهش انتخاب شد. نظر به اینکه سازه وارد کرنش پلاستیک نشد خستگی تنها به صورت پرچرخه در نظر گرفته شد، چگونگی رفتار مواد تحت بارگذاری‌های خزش، خستگی و اندرکنش خزش-خستگی تعیین شد. چگونگی افزایش دقت پاسخ‌های خروجی با استفاده از همگرایی مش و تعادل نیروی بین وزن روتور و نیروهای وارده بر تکیه گاه، صورت گرفت. در قسمت بعد حل مسأله به تفصیل بیان شد.

بعد از تخمین عمر محور توربین پرفشار در یک موتور توربوفن بر اساس شرایط واقعی و فرض‌های صورت گرفته در طراحی محور توربین، نتایج زیر حاصل میشوند:

- عمر خزش خستگی محور توربین پرفشار موتور توربوفن ۳۸۴۱۰ سیکل روشن-خاموش برآورد می شود.

- نیروهای گریز از مرکز با توجه به دمای بالای، عامل اصلی خرابی در محور توربین می‌باشند.

- با توجه به دمای ذوب آلیاژ، تاثیر خرابی خزشی نسبت به خرابی خستگی کم تر است.

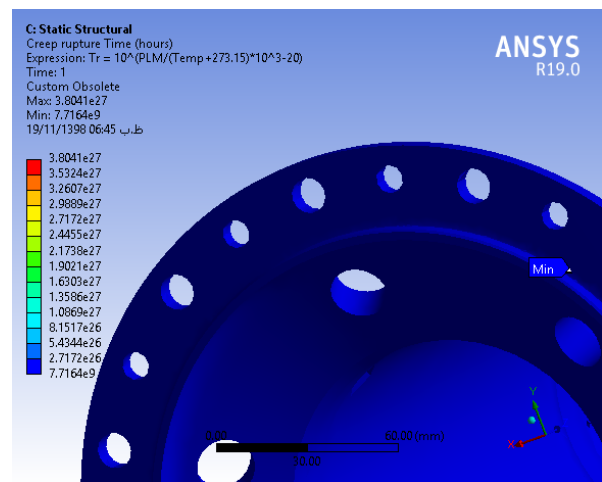
- با توجه به اینکه عمده مقدار تغییر شکل مربوط به تغییر شکل طولی است، ضروری است به لقی محوری توجه شود.

۶- مراجع

- [1] N. C. B. a. C. B. McCrum, Principles of Polymer Engineering, Oxford Science Publications, Oxford, 2013.
- [2] L. F. R., "A time temperature relationship for rupture and creep stress," ASME, pp. 765-775, 1952.
- [3] R. I. Stephens , A. Fatemi, Metal Fatigue In Engineering.
- [4] S. Taira, "Lifetime of structures subjected to varying

جهت تخمین عمر خزشی، با استفاده از شکل ۶، و رابطه لارسون میلر، زمان گسیختگی برای هر سیکل بدست می آید و با جایگذاری در رابطه، t_r بر حسب ساعت بدست می آید.

نتیجه را می توان در شکل های زیر بررسی کرد؛



شکل ۱۷: تخمین عمر خزشی با استفاده از رابطه لارسون میلر

برای تخمین عمر خزش خستگی، باید خرابی هر یک خزش و خستگی را محاسبه کرد و سپس با استفاده از اصل جمع خرابی آنها را با یکدیگر جمع نمود، که؛

$$D_{Fatigue} = \frac{n_1}{N_{fatigue 1}} + \frac{n_2}{N_{fatigue 2}} \quad (8)$$

$$D_{Creep} = t_t / t_r \quad (9)$$

$N_{(fatigue 1)}$: عمر کاری در حالت کروز که سرعت دورانی دو محور عمود بر شفت صفر است

$N_{(fatigue 2)}$: عمر کاری در حالت نشست یا برخواست که سرعت دورانی دو محور عمود بر شفت ۰.۳ و ۰.۵ رادیان بر ثانیه است.

و اگر برای قطعه $t_t=2$ hr باشد

برای اینکه تعداد سیکل یا عمر نهایی (N_f) بدست آید، D_{total} را برابر یک می گیریم.

- load and temperature, in Creep in structures," *Springer*, pp. 96-124, 1962.
- [5] Shunnan Zhang, Huafeng Yu, Tianxiang Zhang, Yaoxiao Zhu, Xiuzhen Ning and Zhuangqi Hu, "Incoloy 901 alloy with improved malleability," *Materials Science and Engineering*, vol. 158, pp. 47-51.
- [6] D. a. Associates, ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials, the material information society, 1997.
- [7] R. A. K. a. E. T. Castillo, "Lifetime prediction under constant load creep conditions for a cast Ni-base superalloy," *Journal of engineering for gas turbines and power*, vol. 109, pp. 99-106, 1987.
- [[^]] شیگلی، میشکه، بادیناس، طراحی اجزا ماشین، نوپردازان، ۱۳۸۵.
- [9] S. S. N. a. R. G. Sajjadi, "Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy," *Materials Science and Engineering*, vol. 352, pp. 484-489, 2002.
- [10] "Special Metals," [Online]. Available: www.specialmetals.com.
- [11] ECSS-E-ST-32-03C, European Cooperation for Space Standardization, 2008.