

## تخمین عمر باقیمانده خزشی پره‌های توربین گازی ساخته شده از سوپرآلیاژ پایه نیکل IN 792

پره‌های توربین، در اثر کارکرد در دماهای بالا و به مدت زمان طولانی به دلایل مختلفی مانند خزش، خستگی، اکسیداسیون و ... تخریب می‌شوند. در این مطالعه، عمر باقیمانده پره‌ی توربین گازی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN 792 که به مدت زمان ۸۰۰۰۰ ساعت کار کرده است، با استفاده از بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، تحلیل‌های نرم‌افزاری و آزمون‌های مکانیکی مانند کشش در دمای کاری و تنش-گسیختگی بررسی گردید. در اثر کارکرد در دمای بالا، تحت تنش ثابت و طی زمان طولانی فازهای مخرب در ریزساختار پره تشکیل شده و مورفولوژی فاز رسوبی گاما پرایم از حالت ایده‌آل خود انحراف پیدا کرده و کشیده شده و فازهای مخرب در ریزساختار تشکیل شده است. همچنین در اثر سرویس در دمای بالا و به مدت طولانی استحکام تنش-گسیختگی پره نسبت به آلیاژ کارنکرده، ۲۰ درصد افت نشان می‌دهد. با انجام تحلیل تنشی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و سپس تحلیل عمر خزشی مشخص گردید که عمر کاری این قطعه به پایان رسیده است.

ابوالفضل کریمی<sup>۱</sup>

کارشناس ارشد

حسین یارمحمدتوسکی<sup>۲</sup>

کارشناس ارشد

محمد نوری<sup>۳</sup>

کارشناس ارشد

محمد مهدی برجسته<sup>۴</sup>

کارشناس ارشد

حسین محمد کریمی یزدی<sup>۵</sup>

کارشناس

واژه های راهنما: پره توربین، فاز گاماپرایم، عمر خزشی، تحلیل استحکامی، پارامتر لارسون میلر

### ۱- مقدمه

تخمین عمر کاری پره‌ها با استفاده از نوع موتور، شرایط کاری، بارهای وارده و ... صورت می‌پذیرد. پره‌های توربین که عموماً از سوپرآلیاژهای پایه نیکل ساخته می‌شوند، در طول سرویس بدلائل مختلفی دچار تخریب می‌شوند. عواملی مانند خواص مکانیکی پره، بارهای وارده، شرایط محیطی، شرایط سوخت مورد استفاده و دمای کاری بر روی عمر کاری پره‌ها تاثیر بسزایی دارند. پدیده‌هایی مانند خزش، خستگی کم چرخه و پرچرخه، خستگی حرارتی، خوردگی، اکسیداسیون، سایش و فرسایش عمده‌ترین مکانیزم‌های تخریب قطعات

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، سازمان صنایع هوایی، تهران Abolfazl.krm@gmail.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، سازمان صنایع هوایی، تهران Hosseinyt@gmail.com

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، سازمان صنایع هوایی، تهران Noori\_mohammad61@yahoo.com

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، سازمان صنایع هوایی، تهران Tembarjesteh@yahoo.com

<sup>۵</sup> کارشناس مهندسی مواد و متالورژی، سازمان صنایع هوایی، تهران Karimihmy@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۰۸

هستند [۱-۳]. پره‌های توربین موتورهای گازی عمر محدودی داشته و بایستی بعد از اتمام دوره‌ی سرویس از روی موتور برداشته شده و جایگزین شوند. غالباً این پره‌ها با روش‌های معمولی مثل برداشتن و جایگزین کردن پوشش و نیز جوشکاری‌های موضعی دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما در تمامی این روش‌های معمولی به عدم تغییر در ساختار آلیاژ در اثر کارکرد اعتماد شده و تغییرات ریزساختاری در طول سرویس مورد بررسی قرار نمی‌گیرند [۴].

آنچه در تخمین عمر باقیمانده پره‌های توربین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، تغییرات ریزساختاری در این پره‌ها در اثر کارکرد در دمای بالا و به مدت زمان طولانی است که با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تغییرات مورفولوژی فاز استحکام بخش گاما پرایم ( $\gamma'$ )، امکان تشکیل فازهای مضر و ... از جمله پارامترهایی است که بایستی مورد بررسی قرار شود [۳-۵].

ریزساختار سوپرآلیاژها شامل فاز زمینه گاما ( $\gamma$ )، فاز استحکام بخش گاما پرایم، کاربیدها و ... است. در اثر کارکرد در دمای بالا به مدت طولانی و به دلیل ضریب نفوذ بالای عناصر آلیاژی، رسوبات گاما پرایم درشت شده و به هم می‌چسبند و حالت رشته‌ای یا الواری (Rafting) پیدا می‌کنند که در این حالت رسوبات ثانویه ناپدید می‌شوند. پدیده الواری شدن نتیجه اعمال تنش در دمای بالا در یک جهت خاص به پره می‌باشد. از آنجایی که در سوپرآلیاژهای پایه نیکل، رسوبات  $\gamma'$  مهم‌ترین عامل حفظ استحکام در دمای بالا بوده و نیز به عنوان سدی در برابر حرکت نابجایی‌ها (یکی از مکانیزم‌های خزش) عمل می‌نمایند، بنابراین تغییر در مورفولوژی و توزیع این رسوبات خواص مکانیکی و خصوصاً استحکام خزشی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند [۴ و ۶]. علاوه بر تغییر مورفولوژی  $\gamma'$  در اثر پیر شدن، با توجه به ترکیب آلیاژ، ممکن است ترکیبات بین فلزی مضر<sup>۱</sup> (TCP) مانند فاز سیگما با چقرمگی کم در ساختار تشکیل شود که به شکل صفحه‌ای رسوب می‌کند. این فازها، ساختار را شکننده کرده و به رشد ترک کمک می‌کنند. همچنین با از بین بردن عناصر استحکام دهنده محلول جامد مثل مولیبدن از زمینه آستنیتی گاما، خواص خزشی را کاهش می‌دهد. تغییرات ریزساختاری ناشی از کارکرد، تاثیر مستقیمی بر روی خواص مکانیکی سوپرآلیاژها داشته و خواص خزشی آنها به مرور کاهش می‌یابد [۳ و ۴].

محاسبه عمر خزشی و خستگی (ناشی از بار سیکلی بدلیل خاموش و روشن شدن) پره‌های توربین با استفاده از تحلیل‌های المان محدود و استفاده از نرم‌افزارهای تحلیلی مورد توجه محققان این امر بوده است. در تمامی این تحقیقات، این امر با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS مقدار تنش و کرنش اعمالی به پره را تحت شرایط کاری محاسبه و با استفاده از خواص مکانیکی پره عمر خزشی و خستگی بررسی شده داده است. با توجه به اینکه در توربین‌های گازی زمینی به علت دفعات کم خاموش-روشن عمر خزشی بر عمر خستگی غالب می‌باشد [۷].

برای بررسی عمر خزشی آلیاژها، روابط و مکانیزم‌ها مختلفی ارائه شده‌است که می‌توان با استفاده از نتایج آزمون تنش-گسیختگی عمر کاری قطعات را پیش‌بینی کرد. یکی از اصلی‌ترین روابط برای تحلیل عمر خزشی، استفاده از رابطه لارسون می‌گردد. بر اساس این رابطه (۱) داریم:

$$P = T (\log t + C) \quad (1)$$

<sup>1</sup> Topography Closed Pack

که در آن  $P$  پارامتر لارسون-میلر،  $T$  دما برحسب کلوین،  $t$  زمان گسیختگی بر حسب ساعت و  $C$  ثابت لارسون-میلر که برای سوپر آلیاژها حدود ۲۰ است. [۸ و ۹]. در این پژوهش عمر باقیمانده پره‌های فشار بالا توربین<sup>۱</sup> (HP) ساخته شده از سوپر آلیاژ پایه نیکل IN792 با استفاده از مطالعات ریزساختاری، آزمون‌های مکانیکی و تحلیل تنشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در شکل (۱) پره مورد مطالعه و نیز محل‌های نمونه برداری نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی پره با استفاده از دستگاه کوانتومتری ORL بررسی گردید و مشخص گردید که پره از سوپرآلیاژ Inconel 792 ساخته شده است [۴]. ترکیب شیمیایی پره و سوپرآلیاژ IN 792 در جدول (۱) نشان داده شده است. پره توربین مورد مطالعه مربوط به موتور زمینی است که دمای گاز ورودی از محفظه احتراق به بخش توربین ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و دور موتور ۴۲۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. بدلیل تغییرات تنش و همچنین گرادیان دمایی موجود در نواحی مختلف پره، انتظار می‌رود در حین کارکرد ریزساختار قسمت‌های مختلف پره متفاوت باشد. بنابراین از نواحی مختلف پره نمونه‌های مناسب جهت مطالعات ریزساختاری انتخاب گردید و پس از آماده‌سازی، ریزساختار آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۲</sup> (FE-SEM) TESCAN مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اچ کردن ریزساختار از محلول ماربل (Marble) استفاده گردید. با توجه به شرایط کاری آزمون کشش و تنش-گسیختگی بر روی نمونه‌های تهیه شده از پره‌ها صورت گرفت. برای این منظور از دستگاه ATM با ظرفیت ۱۰ ton و مجهز به کوره‌ای تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد استفاده گردید. نمونه‌های کشش و تنش-گسیختگی از ریشه پره و با طول سنجه ۲۰mm و قطر ۴mm تهیه گردید و آزمون کشش گرم و خزش به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM E21 [۱۰] و ASTM E139 [۱۱] صورت پذیرفت.



شکل ۱- شماتیک از پره‌ی مورد مطالعه

<sup>1</sup> High Pressure

<sup>2</sup> Field Emission Scanning Electron Microscopy

## جدول ۱- ترکیب شیمیایی پره

Element	C	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Ti	Ni
Blade	0.13	13.1	9.2	1.5	3.5	3.9	3.4	4.5	60.4
IN 792	0.21	12.7	9	2	3.9	3.9	3.2	4.2	Bal.

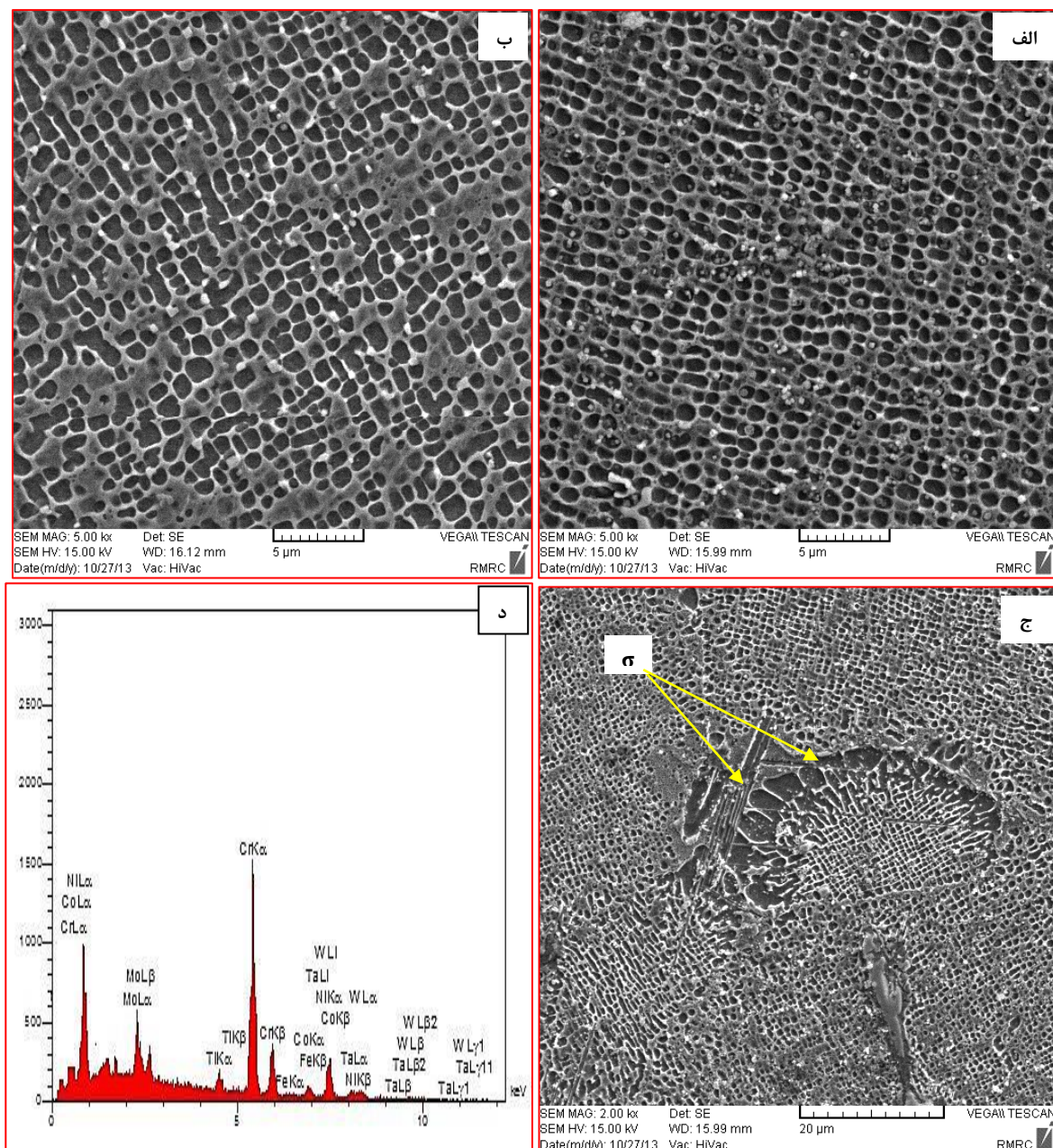
دما و تنش‌های آزمون به نحوی انتخاب شد که اولاً به دمای کاری پره‌ها بسیار نزدیک باشد، ثانیاً در تحلیل‌ها عمر بتوان بیشتر استفاده را کرد و ثالثاً دستگاه آزمون قابلیت کارکرد در این دما را داشته باشد. بدین منظور دماهای ۹۵۰، ۹۷۰ و ۹۸۲ درجه سانتیگراد و به ترتیب تنش‌های ۳۰۰، ۱۸۵ و ۱۵۲ مگاپاسکال برای آزمون تنش-گسیختگی در نظر گرفته شد.

سپس با استفاده از نرم افزار ANSYS تحلیل استحکامی صورت پذیرفت و در نهایت عمر باقیمانده پره‌ها تعیین گردید. با توجه به این‌که هیچگونه پره کارنکرده در دست نبود، بنابراین ریزساختار و خواص مکانیکی آن با آلیاژ IN 792 نو مقایسه گردیده است.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- مطالعات ریزساختاری

ریزساختار قسمت‌های مختلف پره مورد مطالعه در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است. ریزساختار این آلیاژ شامل فاز زمینه گاما (نواحی خاکستری) و فاز رسوبی گاما پرایم (نواحی تیره) است. آنچه که در این تصاویر میکروسکوپی مشخص است تغییر مورفولوژی فاز رسوبی گاما پرایم از حالت مکعبی به حالت کروی در تمام نواحی است. در تمامی سوپرآلیاژهای پایه نیکل ریختگی مانند IN 792، هرچه نسبت طول به عرض فاز گاما پرایم به عدد یک نزدیک باشد، بهترین مقاومت خزشی را خواهد داشت. با توجه به تصاویر FE-SEM در برخی مناطق نسبت طول فاز رسوبی گاما پرایم به عرض آن تا ۵ نیز می‌رسد. علاوه بر تغییر مورفولوژی، پدیده الواری شدن نیز در ریزساختار این سوپر آلیاژ مشخص است. بیشترین تنش بر روی پره‌ها در راستای طول پره اعمال می‌گردد که در اثر تنش اعمالی در این راستا و نیز دمای کاری بالا رسوبات در راستای اعمال تنش کشیده می‌شود که مناسب برای کارکرد در دمای بالا نیست. بدلیل نفوذ عناصر آلیاژی، فازهای مخرب TCP در ریزساختار این پره تشکیل شده است که در شکل (۲-ج) مشخص است. آنالیز EDS نشان داد که این فاز سیگما با ترکیب نزدیک به ترکیب CoCrMo است (شکل ۲-د). فازهای مخرب TCP در اثر کارکرد در دماهای بالا و زمان‌های طولانی ایجاد می‌شوند. با توجه به دمای بالای کاری پره‌های HP و نیز زمان کارکرد بالای آنها، وجود این فازهای مخرب در ریزساختار این پره قابل پیش بینی است.



شکل ۲- الف) ریزساختار ناحیه نزدیک به نوک پره، ب) ریزساختار انتهای پره،

ج) تشکیل فازهای TCP در پره و د) آنالیز EDS فاز TCP

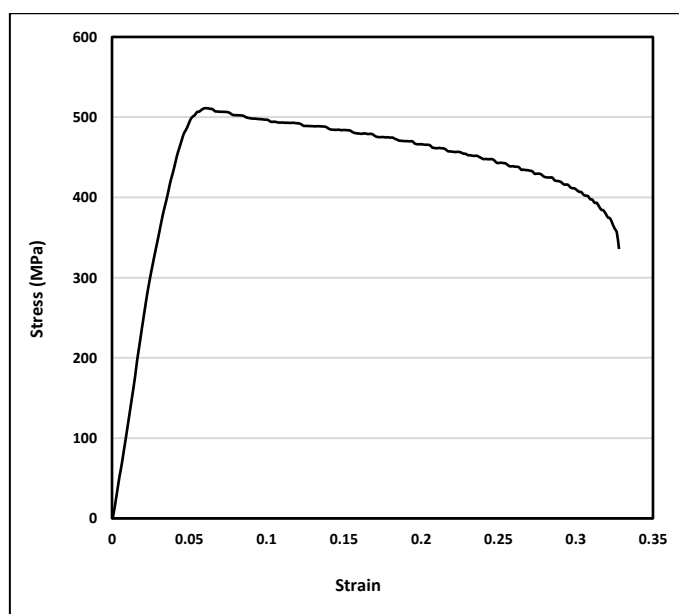
### ۲-۳- خواص کششی

خواص کششی هر ماده به عنوان مهم ترین مشخصه مواد مهندسی از اهمیت بالایی برخوردار است. اطلاعات بسیار زیادی مانند استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول و ... از این آزمون می توان بدست آورد. با توجه به اینکه دمای گاز ورودی به توربین ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بوده و عموماً دمای پره کمتر از گاز است، دمای آزمون کشش ۹۵۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. ثانیاً بدلیل اعمال پوشش دمای واقعی آلیاژ پایه کمتر از دمای گاز خواهد بود. شکل (۳) منحنی تنش- کرنش این پره را در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد نشان می دهد.

استحکام تسلیم و کششی نهایی این آلیاژ به ترتیب ۴۰۰ و ۵۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. استحکام تسلیم این آلیاژ با استفاده از روش ترسیم خط موازی ناحیه الاستیک به فاصله ۰,۲٪ حاصل گردیده است.

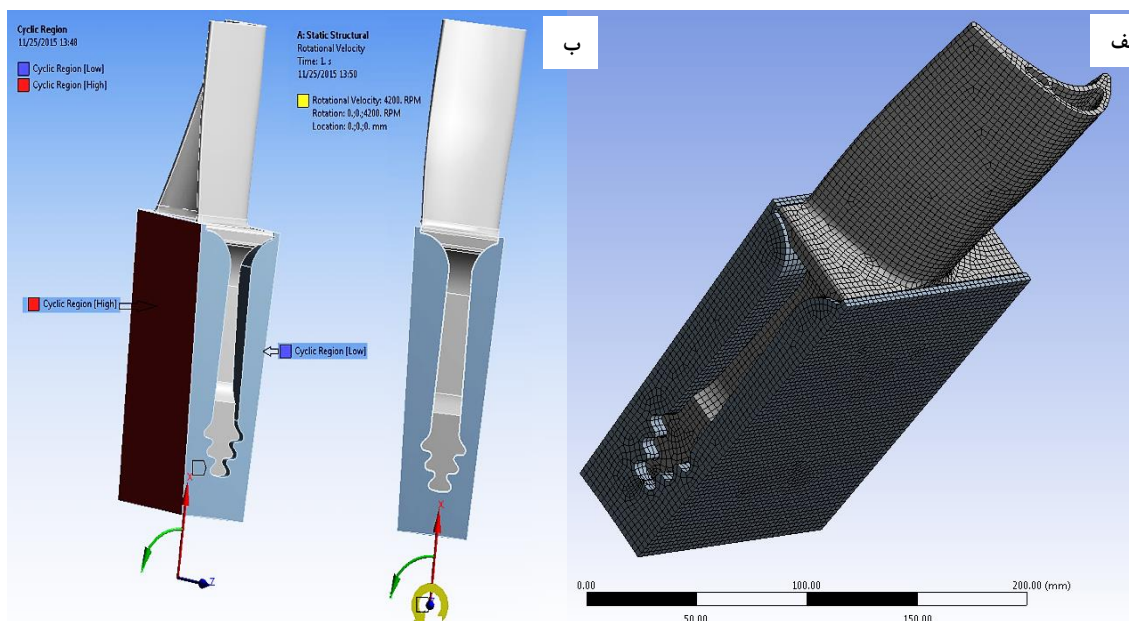
### ۳-۳- تحلیل استحکامی

یکی از مراحل تخمین عمر قطعات تحلیل تنش است. هدف از این کار تعیین نقاط بحرانی قطعه و توزیع تنش در قطعه است. به منظور مشخص نمودن نقاط بحرانی، تحلیل استحکامی صورت گرفت و نقاط بحرانی پره مشخص گردید. برای رسیدن به جواب دقیق‌تر قطعی از دیسک که پره‌ها بر روی آن می‌نشینند مدل شده و پره بر روی آن تحلیل گردید. مش بندی مدل براساس المان Solid186 استفاده شده است که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. علت استفاده این نوع المان در مش بندی مدل قابلیت تغییر شکل این المان بصورت مخروطی، هرمی و منشوری می‌باشد، بدون اینکه خطایی در نتایج تحلیل ایجاد کند. در واقع با توجه به شکل هندسی مدل این المان قابلیت تبدیل به شکل‌های مختلف را دارا می‌باشد و در صورتی که دو نود از یک المان بر روی هم قرار گیرند و در اصطلاح degeneration بوجود آید در نتایج معادلات تحلیل خطایی بوجود نخواهد آمد. در شکل (۴) مدل المان محدود این پره ارائه شده است. تعداد نود و المان‌های این مدل به ترتیب ۳۴۱۴۲۳ و ۹۱۱۸۸ می‌باشد. در شکل (۴-ب) بارگذاری و اعمال شرایط مرزی این پره آورده شده است. دور اعمال شده به این مدل ۴۲۰۰ rpm و اثر دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد اعمال گردیده است. برای خطای کم، تحلیل با استفاده از تعریف Cyclic صورت پذیرفت.



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش پره در دمای ۹۵۰°C





شکل ۴- الف) مدل المان محدود پره به همراه قطاع دیسک، ب) شرایط بارگذاری پره

جهت انجام تحلیل نیز از خواص مکانیکی حاصل از آزمون کشش در دمای کاری استفاده گردید. نتایج تحلیل استحکامی در شکل‌های (۵) و (۶) آورده شده است. مقدار حداکثر تنش ون میسز و ترسکای این پره به ترتیب ۴۶۰ و ۵۰۶ مگاپاسکال و ضریب اطمینان حداقل آن در ناحیه حداکثر تنش ون میسز و ترسکا نسبت به استحکام تسلیم به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۷۹ حاصل گردید، که این امر نشان دهنده افت خواص استحکامی پره و وارد شدن پره به ناحیه پلاستیک می‌باشد.

تحلیل استحکامی این پره‌ها در ناحیه الاستیک صورت می‌گیرد و ضریب اطمینان طراحی آنها طبق استحکام تسلیم باید بزرگتر از ۱ باشد. در واقع با انجام تحلیل تنشی بایستی گفت که بعد از گذشت ۸۰۰۰۰ ساعت کارکرد در دمای بالا و تحت تنش کششی ثابت خواص مکانیکی بخصوص استحکام تسلیم و استحکام نهایی در این قطعه به شدت کاهش یافته است.

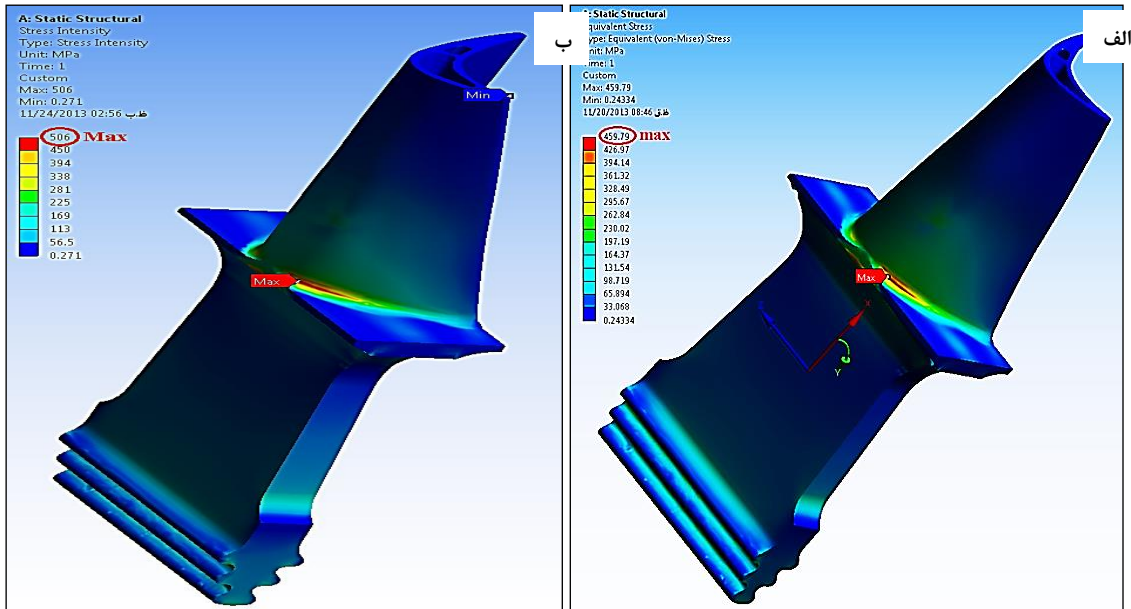
### ۴-۳- تخمین عمر خزشی باقیمانده پره

با توجه به اینکه اصلی‌ترین مکانیزم تخریب پره‌های توربین پدیده خزش است، جهت بدست آوردن استحکام خزشی این پره‌ها، بر روی سه نمونه آزمون تنش-گسیختگی در شرایط تنشی و دمایی مختلف انجام گرفت. منحنی خزشی این پره در شکل (۷) نشان داده شده است. برای تحلیل نتایج خزش و بدست آوردن عمر خزشی از رابطه لارسون میسر استفاده گردید. بر اساس این رابطه داریم:

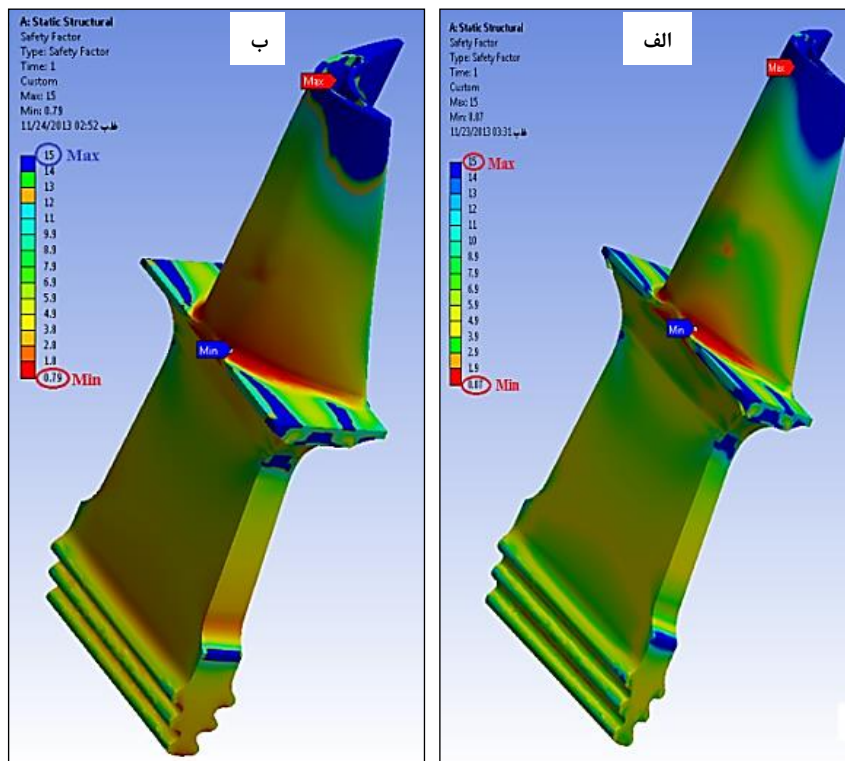
$$P = T (\log t + C) \quad (1)$$

که در آن  $P$  پارامتر لارسون-میلر،  $T$  دما بر حسب کلونین،  $t$  زمان گسیختگی بر حسب ساعت و  $C$  ثابت لارسون-میلر که برای سوپرآلیاژهای پایه نیکل حدود ۲۰ است. در جدول (۲) خواص تنش-گسیختگی این پره آورده شده است.

همچنین مقایسه‌ی بین پارامتر لارسون میلر پره کارکرده HP با آلیاژ IN792 در شکل (۷) رسم گردیده است. همان طور که مشخص است در اثر کارکرد به مدت ۸۰۰۰۰ ساعت استحکام خزشی پره نسبت به استحکام خزشی گزارش شده برای آلیاژ IN 792 حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. به عبارت دیگر در یک تنش ثابت مقادیر پارامتر لارسون میلر برای نمونه‌های تست شده ۲۰ درصد کمتر از آلیاژ IN 792 کار نکرده است.

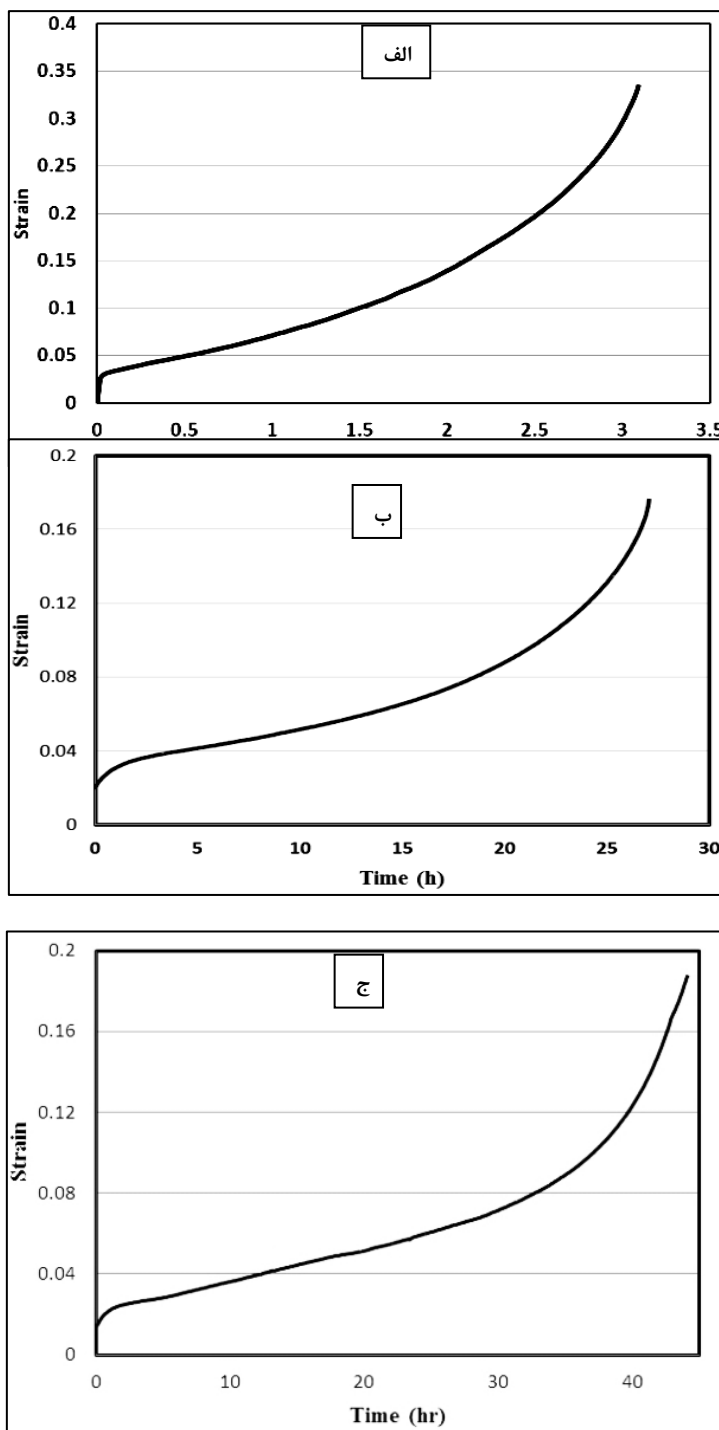


شکل ۵- کانتور تنش الف) معیار ون میسز و ب) معیار ترسکا



شکل ۶- ضریب اطمینان (a) ون میسز و (b) ترسکا





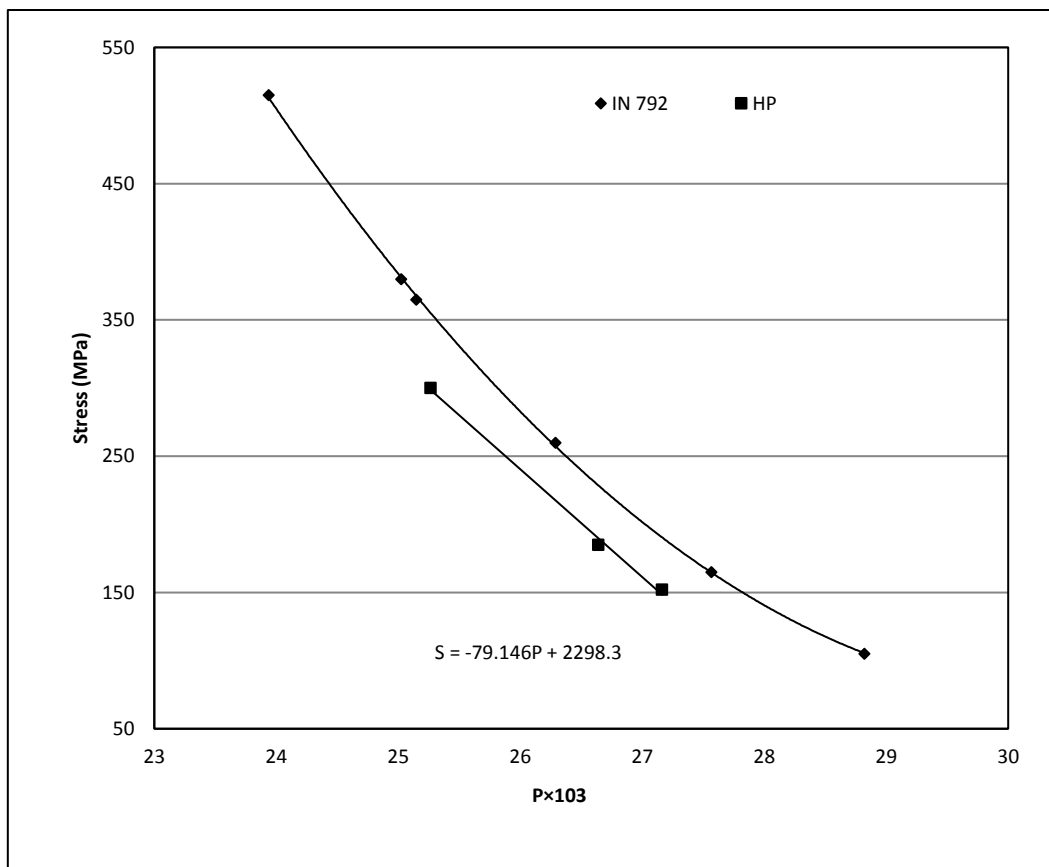
شکل ۷- منحنی تنش- گسیختگی پره در الف) دمای  $950^{\circ}\text{C}$  و تنش  $300\text{ MPa}$ ، ب) دمای  $970^{\circ}\text{C}$  و تنش  $185\text{ MPa}$  و ج) در دمای  $982^{\circ}\text{C}$  و تنش  $152\text{ MPa}$

بیشترین تنش بر روی پره مطابق با معیار ترسکا  $506\text{ MPa}$  است. با تقریب قابل قبولی می توان رابطه تنش بر حسب پارامتر لارسون میلر را خطی در نظر گرفت. با در نظر گرفتن تنش  $506\text{ MPa}$  در رابطه شکل (۸) مقدار  $P$ ،  $22645$  خواهد بود که با لحاظ کردن دمای  $1000$  درجه سانتیگراد می توان گفت عمر کاری این پره با توجه به مود غالب شکست آن به پایان رسیده است.

در صورتی که دمای پره ۸۵۰ درجه سانتیگراد باشد، در این صورت مقدار  $t$  حدود ۱/۴۶ ساعت بدست خواهد آمد که زمان بسیار کمی است. بنابراین بر اساس این معیار می‌توان دریافت که عمر کاری پره به پایان رسیده است. در صورتی که از معیار ون میسر برای تخمین عمر باقیمانده استفاده شود، بیشترین تنش روی قطعه ۴۶۰ مگاپاسکال است که در این صورت مقدار پارامتر لارسون میلر ۲۳۲۲۶ خواهد بود که در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌توان گفت عمر کاری این پره به پایان رسیده است و با فرض دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد، عمر باقیمانده آن ۴/۸ ساعت خواهد بود. که بازهم زمان بسیار محدودی است. بنابراین مطابق با هر دو معیار عمر کاری پره به پایان رسیده است. دلیل اتمام عمر کاری پره‌ها، پدیده Rafting بدلیل کارکرد در دمای بالا، نفوذ عناصر آلیاژی و تشکیل فازهای مخرب است.

جدول ۲- خواص خزشی پره

T (°C)	Stress (MPa)	Time (h)	P*10 <sup>3</sup>
960	300	3.07	25.26
970	185	27	26.64
982	152	43.8	27.17



شکل ۸- گراف لارسون میلر برای آلیاژ IN 792 کار نکرده و پره کار کرده (HP)

#### ۴- نتیجه گیری

- پس از بررسی‌های انجام گرفته بر روی پره‌های توربین موتورگازی نتایج زیر قابل بیان است:
- ۱- در اثر کارکرد در دمای بالا، ریزساختار پره مورفولوژی فاز رسوبی گاماپرایم از حالت مکعبی به کروی تغییر یافته و پدیده الواری شدن اتفاق افتاده است. در ریز ساختار پره فازهای مخرب TCP نیز مشاهده گردید که بسیار ترد بوده و سبب افت شدید چقرمگی و عمر خزشی می‌شود.
  - ۲- پس از انجام تحلیل تنش بر روی پره مقدار حداکثر تنش ون میسز و ترسکا به ترتیب ۴۶۰ و ۵۰۶ مگاپاسکال بدست آمد. همچنین ضریب اطمینان پره در ناحیه حداکثر تنش ون میسز و ترسکا، نسبت به استحکام تسلیم به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۷۹ می باشد.
  - ۳- در اثر کارکرد به مدت ۸۰۰۰۰ ساعت، استحکام خزشی پره نسبت به استحکام خزشی گزارش شده برای آلیاژ IN 792 حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است. مطابق با هر دو معیار ترسکا و ون میسز عمر کاری پره در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به پایان رسیده است. اگر دما ۸۵۰ درجه فرض شود، در این صورت عمر این قطعه کمتر از ۵ ساعت است.

#### مراجع

- [1] Carter, T.J., "Common Failures in Gas Turbine Blades", Journal of Engineering Failure Analysis, Vol. 12, pp. 237-247, (2005).
- [2] Mazur, Z., Luna-Ramirez, A., Juarez-Islas, J.A., and Campos-Amezcuca, A., "Failure Analysis of a Gas Turbine Blade made of Inconel 738LC Alloy", Journal of Engineering Failure Analysis, Vol. 12, pp. 474-486, (2005).
- [3] Pollock, T. M., "Nickel-based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties", Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 2, pp. 361-374, (2006).
- [4] ASM Metals Handbook, Vol. 1, pp. 1478-1571, ASM International, USA, (2005).
- [5] Liburdi, J., Douglas, P., Nagy, D., De Priamus, T.R., and Shaw, S., "Practical Experience with the Development of Superalloy Rejuvenation", Gas Turbine Technical Congress & Exposition, Orlando, Florida, USA, June 8-12, (2009).
- [6] Kamaraj, M., "Rafting in Single Crystal Nickel-base Superalloys—An Overview", Sadhana Vol. 28, pp. 115-128, (2003).
- [7] Dedekind, M.O., "Implementation of Creep-fatigue Model into Finite Element Code to Assess Cooled Turbine Blade", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 59, pp. 13-19, (1994).

- [8] Marahleh, G., Kheder, A.R.I., and Hamad, H.F., "Creep Life Prediction of Service-exposed Turbine Blades", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 433, pp. 305–309, (2006).
- [9] Sajjadi, S.A., Nategh, S., and Roderick, I.L., "Guthrie Study of Microstructure and Mechanical Properties of High Performance Ni-base Superalloy GTD-111", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 325, pp. 484–489, (2002).
- [10] *ASTM Standards Handbook*, ASTM E21, ASTM International, USA, (2013).
- [11] *ASTM Standards Handbook*, ASTM E139, ASTM International, USA, (2013).

## Abstract

During the operation, the turbine blades of hot gas path suffer service induced degradation due to different causes such as creep, fatigue, oxidation, corrosion and etc. The present study was carried out the effect of long-term service at the high temperature exposure to remaining life assessment gas turbine blade made of Inconel 792 nickel base superalloy. That is investigated by studying on microstructure by optical and scanning electron microscopy, mechanical properties such as high temperature tensile and stress-rupture test and stress analyses of turbine blade. The result has been shown the gamma prime rafting and TCP phase formation has occurred at the microstructure. Because of long-term service at high temperature, stress-rupture properties of blade reduced and 20% lower than new IN 792 alloys. The stress analyses with ANSYS software and creep life assessment results by use Larson-miller parameter, the safety factor of blade lower than 1 and life time of turbine blade is finished.