

## پیش‌بینی عمر خزشی پره‌های توربین تعمیر شده از دو جنس

اسماعیل برزکار<sup>۱</sup> و محمدرضا فروزان<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اصفهان

( تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۵/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۱۹ )

### چکیده

توربین‌های گاز کاربرد فراوانی در صنایع نیروگاهی و هوافضائی دارند. امروزه، بر مبنای جوشکاری دوجنسی، روش‌های اقتصادی برای تعمیر پره‌های این نوع توربین‌ها ابداع شده است. در این مقاله، روشی برای تعیین عمر خزشی یک قطعه تعمیر شده از دو جنس مختلف بر مبنای تحلیل اجزاء محدود گذرا ارائه شده است. بدین منظور، یک طرح ساده دو بعدی تحت نیروی گریز از مرکز پیشنهاد شده است. جنس ماده پایه و پرکننده به ترتیب سوپرآلیاژهای GH 4049 و Inconel 718 در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به وابستگی تنش‌ها به زمان، عمر پره با استفاده از قانون کسری جمع آثار آسیب، به کمک برنامه‌نویسی در نرم‌افزار انسیس تعیین شده است. جهت اطمینان، آزمایشی طرح‌ریزی شده که معرف نحوه خزش المان‌های بحرانی در مجاورت هم می‌باشد. در این آزمایش، از سرب به‌عنوان جنس نرم‌تر و از قلع ۷۰٪-سرب ۳۰٪ به‌عنوان جنس سخت‌تر استفاده شده و نتایج آزمایش با نتایج تحلیل عددی مقایسه شده است. بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی برابری بسیار خوبی مشاهده می‌شود. نقطه گسیختگی به درستی پیش‌بینی شده و خطای پیش‌بینی عمر آن با مقدار حاصل از آزمایش فقط ۶ درصد اختلاف دارد. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت بین خواص خزشی دو جنس پایه و پرکننده در مکان و شکل فرضی نزدیک ریشه پره موجب کاهش عمری معادل ۹۰٪ عمر مینا خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** خزش، پیش‌بینی عمر، تعمیر دوجنسی، تحلیل اجزاء محدود گذرا، پره توربین

## Creep Life Assessment of Repaired Turbine Blade from Two Substances

E. Barzkar and M.R. Forouzan

Mech. Eng. Dep't

Isfahan Univ. of Tech.

(Received: 26 July, 2010; Accepted: 9 May, 2011)

### ABSTRACT

Gas Turbines have wide applications in power plants and aerospace industries. Nowadays, based on welding of two different materials, some economic methods for repairing turbine blades have been developed. In this paper, a method, for determining creep life of a RTB (Repaired Turbine Blade) of two substances, based on transient FEM method had been developed. To find the effect of the difference between creep properties of materials of two substances RTB's, a simple 2D model under centrifugal forces was modeled. The base and filler metals were GH 4049 and Inconel 718, respectively. Creep is time dependent deformation of metals at elevated temperatures, therefore stresses are also time dependent. Hence, the life of RTB was estimated using damage fraction rule. These were performed using APDL ANSYS commercial software codes. To verification of the method, an experiment test has been established which defined the way critical elements behaved. In this experiment, pure lead was used as softer and Tin70%-lead30% was used as harder metal in creep. Experimental and numerical models were compared and good agreements between them were found. Rupture point was truly predicted and relative error was only 6% (traditional methods had 20% error). Results showed that the difference between creep properties of base and filler metals for supposed geometry and repaired location, leads to 90% decrement of designed life.

**Keywords:** Creep, Life Assessment, Repaired Turbine Blade, Transient Analysis

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: e.barzkar@me.iut.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): forouzan@cc.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در دنیای پیشرفته امروزی، انرژی و تأمین آن اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از مهم‌ترین روش‌های تأمین انرژی الکتریکی به خصوص در کشور ما، استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی در نیروگاه‌های گازی است. هم‌چنین در مصارف هوا-فضا و نظامی از توربین‌های گازی در موتورهای توربوجت و توربوپن، برای تأمین نیروی پیشران هواپیما و انرژی مورد نیاز در کمپرسور برای فشرده‌سازی هوای ورودی و مصارف جانبی هواپیما استفاده می‌شود. توربین‌ها و کمپرسورهای جت، از دسته‌ها و طبقاتی از پره‌ها تشکیل شده‌اند که این پره‌ها، به خصوص پره‌های توربین، تحت دمای بسیار بالا و نیروهای گریز از مرکز شدیدی قرار دارند. همه پره‌های دوار توربین و برخی اوقات پره‌های طبقه پرفشار کمپرسور در معرض خزش قرار دارند. خزش، نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی و تعیین عمر آن‌ها دارد. در توربین‌های گازی، که کمتر روشن و خاموش می‌شوند، خزش مهم‌ترین عامل محدودکننده عمر پره‌ها است [۱].

در برخی موارد، پره‌ها برای بازیابی، تعمیر شده و دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرند. پره‌های توربین نسبت به سایر اجزاء توربین، تحت تنش‌های بالاتری قرار داشته و بررسی واماندگی<sup>۱</sup> آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. حد تحمل پره‌های متحرک در برابر ترک‌ها و عیوب نسبت به پره‌های ثابت به مراتب کمتر است [۲]. بنابراین معیار واماندگی برای پره‌های متحرک، جوانه‌زنی ترک است. از این رو، تعیین عمر پره‌های تعمیر شده و زمان اتمام عمر آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. با دانستن زمان عمر نهایی پره تعمیر شده، از شکست‌های پیش‌بینی نشده و زودرس جلوگیری خواهد شد.

امروزه، روش‌های اقتصادی برای تعمیر پره توربین‌های گازی بر مبنای جوشکاری لیزری ممکن شده است. متأسفانه به دلیل جوش‌پذیر نبودن سوپرآلیاژهای پایه نیکل هم‌جنس، ماده پرکننده<sup>۲</sup>، از سوپرآلیاژهای با ترکیب متفاوت انتخاب شده است. به عنوان مثال می‌توان به قابلیت جوشکاری مناسب سوپرآلیاژهای نیکلی پایه ۷۰۰ به سوپرآلیاژهای اینکونل پایه ۶۰۰ اشاره نمود [۳].

تجزیه و تحلیل علت شکست پره‌ها و بررسی ساختار ماده در ناحیه شکسته شده، راه‌کار مناسبی برای تعیین عوامل اصلی واماندگی پره‌ها است [۴-۶]. یکی از روش‌های معمول در تعیین طول عمر پره‌های توربین، برون‌یابی از آزمون‌های خزش شتاب‌یافته<sup>۳</sup> در دما و تنش‌های بالا است [۷-۱۰]. در برخی موارد علت شکست پره توربین، خستگی پرچرخه<sup>۴</sup> گزارش شده است [۱۱-۱۵]. عمر برخی پره‌هایی که بارگذاری متغیر داشته یا مانند موتورهای جت، خاموش و روشن شدن‌های متعددی دارند، علاوه بر خزش، تحت اثر خستگی کم‌چرخه<sup>۵</sup> نیز هستند. در این موارد، پیش‌بینی عمر پره توربین با در نظر گرفتن آسیب خزش و خستگی کم‌چرخه، توأمان مورد توجه قرار دارد [۱۶-۱۸]. تحقیق بر روی شکست پره توربین با رویکرد خوردگی شیمیایی<sup>۶</sup> پره نیز انجام شده است [۱۹-۲۲]. هم‌چنین در برخی موارد با تحلیل مودال پره شکسته شده، علت شکست پره توربین، تشدید منجر به خستگی بیان شده است [۲۳-۲۴]. در تحقیقی دیگر، علت شکست پره توربین، کاهش مقاومت ماده در مقابل بارهای مکانیکی وارده در اثر دمای بالای کاری اعلام شده است [۲۵].

از آنجا که راهکار تعمیر دوجنسی پره‌ها بسیار نوین است، تحقیقی درباره تعیین عمر خزشی پره‌های دوجنسی یافت نشد و این مقاله اولین تحقیق در این حوزه است. به دلایل مختلفی از جمله وجود و رشد ترک در اثر خستگی، یا عیوب ساختاری به جا مانده از ساخت پره و رشد آنها در مدت عملکرد پره‌های توربین تعمیر می‌شوند [۱]. هم‌چنین در اثر ازدیاد طول پره به دلیل خزش یا عوامل دیگر، نوک پره با محفظه توربین برخورد نموده، سایش یافته و باعث ضرورت تعمیر آن می‌شود. برخورد جسم خارجی با پره، بیش‌تر باعث بروز عیب در نواحی کناری پره توربین خواهد شد. ممکن است کل ناحیه تعمیر شده توسط روش‌های نوین جوشکاری از ماده پرکننده پر شود که به طور معمول ماده جدید خواص مکانیکی ضعیف‌تری نسبت به ماده پایه دارد

3- Accelerated Creep Tests

4- High Cycle Fatigue

5- Low Cycle Fatigue

6- Corrosion

1- Rupture

2- Filler

۱- از اثرات سایر بارگذاری‌ها در مقابل اثرات ناشی از نیروی گریز از مرکز صرف نظر شده است. زیرا به‌جز مدت زمان کوتاه راه‌اندازی توربین که به طور تقریبی در خزش بی‌اثر است، گرادیان حرارت در قسمت‌های حساس توربین ناچیز است. از طرفی تنش حاصل از نیروهای آیرودینامیکی نسبت به تنش حاصل از نیروهای گریز از مرکز ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن

$$\text{است } (0.045 \sim 0.076) \cong \left( \frac{F_{aero}}{F_{centrifugal}} \right) \quad [16]$$

۲- از آنجا که پره بیشتر توربین‌ها مقطعی یکنواخت و توخالی دارد، هندسه آن به‌صورت صفحه‌ای مستطیل شکل با ضخامت کم پیشنهاد شده است (فرض تنش صفحه‌ای) و

۳- به دلیل گرادیان پایین توزیع دما در طول ساقه پره و تقریباً ثابت بودن دما در سرتاسر پره، دمای آن نیز در سرتاسر پره در هر شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است [۱۶]. مشخصات هندسی مسئله ساده‌سازی شده، در شکل ۱-الف نشان داده شده است. عوامل مرتبط با این شکل نیز در جدول ۱ ارائه شده است [۵].

جدول (۱): مقادیر عوامل مورد استفاده.

b (mm)	۵۰
$\omega_x$ (RPM)	۵۱۰۰~۳۰۰۰
r (mm)	۵۸۸
l (mm)	۲۲۰
T (°C)	۶۴۹-۷۶۰
فاصله شعاعی مرکز دایره تعمیر شده از محور	۶۰۰ mm
D	۲۰ mm

فرض شده ناحیه  $A_1$  از ماده پایه سوپرآلیاژ GH4049 و ناحیه  $A_2$  از سوپرآلیاژ پرکننده INCONEL 718 (که دارای خواص خزشی نرم‌تری است) ساخته شده است. در شکل ۱-ب نحوه مش‌بندی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اطراف ناحیه ۲ مش‌بندی ریز شده تا تمرکز تنش احتمالی با دقت بهتری شبیه‌سازی شود. به دلیل فرض ضخامت ناچیز صفحه در مقایسه با ابعاد دیگر، مسئله در شرایط تنش صفحه‌ای تحلیل شده است.

[۳]. از این‌رو پیش‌تر، تعمیرات در نواحی کم‌تنش و خنک‌تر پره انجام می‌شده است.

از خصوصیات و مزایای روش جوشکاری با لیزر، کوچک بودن حوضچه مذاب و حرارت کم تزریق شده و تنش‌های پسماند کوچک و اعوجاج کم قطعه پس از عملیات جوشکاری است. در صورتی‌که اصلاح هندسه و از بین بردن مواد باقی‌مانده از جوشکاری لازم باشد، این کار توسط روش‌های مختلف ماشین‌کاری انجام خواهد شد. برای از بین بردن تنش‌های پسماند قابل توجه و برای بازگردانی و بهبود خواص از دست رفته، از روش‌های تنش‌زدایی مانند عملیات حرارتی استفاده می‌شود [۳].

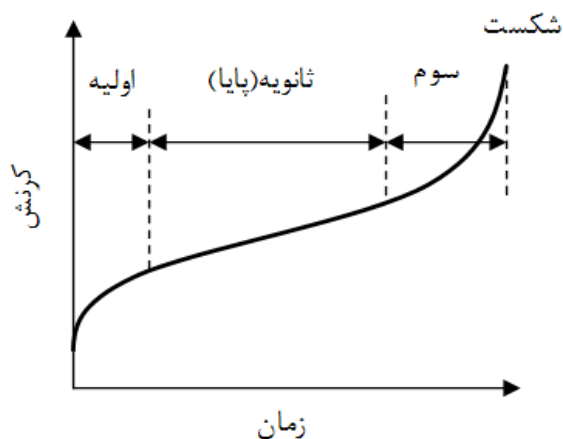
روش جوشکاری لیزری امکان تعمیر پره‌هایی که ناحیه مورد تعمیر در آنها نزدیک ریشه بوده و لذا تنش‌های بالاتری را تحمل می‌نمایند را نیز به خوبی فراهم آورده است. نکته قابل توجه این است که پره‌های تعمیر شده از حداقل دو ناحیه‌مادی تشکیل شده‌اند [۳].

در این تحقیق، با هدف روشن ساختن اثر تعمیرات دوجنسی بر رفتار خزشی و شکست پره‌های توربین، یک هندسه ساده دوبعدی، با بارگذاری فقط دورانی تعریف شده است. علت این انتخاب، کوچک بودن تنش‌های ناشی از نیروهای آیرودینامیکی در مقایسه با تنش‌های گریز از مرکز است (در حدود ۴/۵ تا ۷/۵ درصد) [۱۶] ماده پایه پره‌ها، سوپرآلیاژ پایه نیکل از نوع GH4049 فرض شده است. برای ماده پرکننده از خواص INCONEL 718 استفاده شده است. برای اطمینان از درستی روش، طرحی از المان‌های بحرانی کنار هم با جنس سرب به عنوان جنس نرم‌تر و قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪ به‌عنوان جنس سخت‌تر در خزش ساخته و توسط آزمایش، رفتار خزشی آنها مطالعه شده است.

## ۲- فرضیات حل

با هدف تمرکز بر اثرات اصلی مؤثر بر پدیده خزش، طرحی دوبعدی از پره فرض شده تا اثرات تمرکز تنش هندسه سه‌بعدی پره با اثرات ناشی از تفاوت در کرنش‌های خزشی مشتبه نشود. بدیهی است در یک تحلیل کامل لازم است از طرح‌های سه‌بعدی استفاده شود. فرضیات ساده‌کننده حل عبارتند از:

اولیه<sup>۱</sup>، ثانویه (پایا)<sup>۲</sup> و خزش سوم ناحیه سوم<sup>۳</sup> نام‌گذاری شده‌اند. شکست قطعات در ناحیه سوم خزش رخ خواهد داد.



شکل (۲): نمایش کیفی روندهای مختلف کرنش خزش در دمای بالای ۴۰٪ دمای مطلق ذوب مواد.

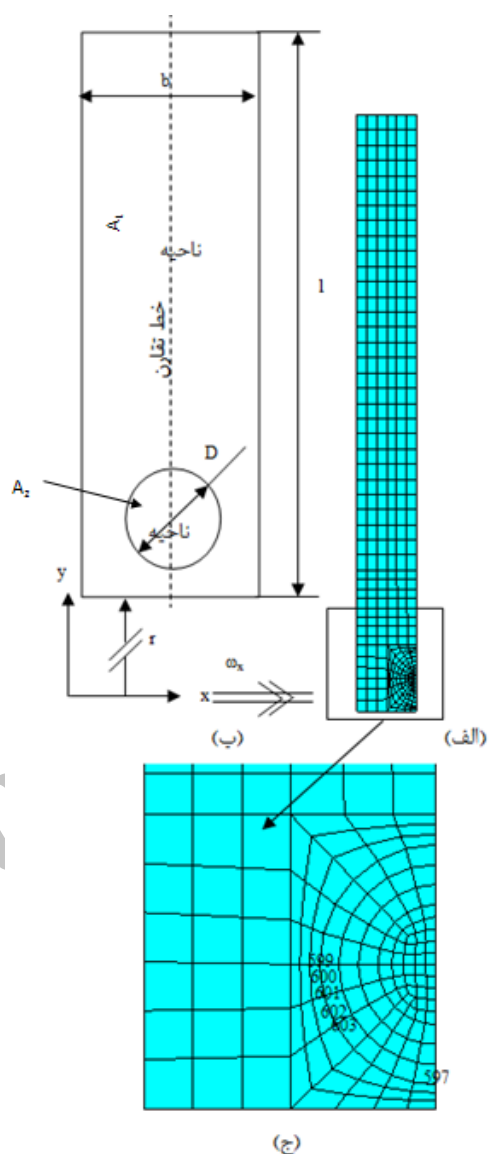
به دلیل آنکه آزمون‌های واقعی خزش بسیار زمان‌بر هستند، در عمل آزمودن و پیش‌بینی جامع رفتار ماده در طیف وسیعی از تنش‌ها و دماها امکان‌پذیر نیست. از اینرو برای کاهش زمان آزمایش، محققین روی به استفاده و گسترش روش‌های شتاب یافته آورده‌اند. یکی از موفق‌ترین این روش‌ها توسط لارسن و میلر<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۲ معرفی شد [۲۷]. در این روش به کمک عامل لارسن-میلر می‌توان اطلاعات جمع-آوری شده تحت شرایط مختلف را در قالب یک معادله بیان نمود. این عامل، ارتباطی بین زمان گسیختگی، دما و تنش آزمون خزش برای همبسته نمودن و برونیابی داده‌های خزش-گسیختگی را به صورت زیر معرفی نموده است:

$$LMP = T (C + \log t_r) \quad (1)$$

به طوری که:

$$LMP = K_4 \log(\sigma) + K_5 \quad (2)$$

در روابط فوق  $C$ ،  $K_4$  و  $K_5$  ثوابت ماده،  $t_r$  زمان گسیختگی،  $LMP$  عامل لارسن-میلر و  $\sigma$  تنش وارده در دمای  $T$  است.



شکل (۱): الف- هندسه مورد تحلیل، ب- نحوه مش‌بندی، ج- المان‌ها و شماره گره‌های بحرانی.

### ۳- تئوری

خزش، تغییر شکل دائمی و آهسته و وابسته به زمان مواد است. این گونه تغییر شکل، به حداقلی از دما و تنش نیاز دارد [۲۶]. در دماهای بالای ۴۰٪ دمای مطلق ذوب مواد و کرنش ناشی از خزش سه روند مختلف وجود دارد. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده این سه روند در اصطلاح روندهای

- 1- Primary
- 2- Secondary
- 3- Tertiary
- 4- Larson-Miller

ثوابت طرح زمان-سختی را برای آلیاژ اینکونل ۷۱۸ و جی اچ ۴۰۴۹ در دماهای مختلف ارائه داده است [۲۹].

**جدول (۲):** ثوابت زمان-سختی برای سوپرآلیاژهای مورد استفاده.

	INCONEL 718			GH4049
T °C	538	649	704	All (K)
C <sub>1</sub>	5×10 <sup>-31</sup>	2×10 <sup>-21</sup>	1×10 <sup>-6</sup>	0.023733
C <sub>2</sub>	9.1064	6.4360	1.2178	1.98314
C <sub>3</sub>	-0.60	-0.65	-0.75	-0.836
C <sub>4</sub>	0	0	0	21994
C <sub>5</sub>	2×10 <sup>-45</sup>	1×10 <sup>-40</sup>	8×10 <sup>-22</sup>	1.2529
C <sub>6</sub>	13.31	12.89	6.73	7.2905
C <sub>7</sub>	-0.75	0	0	65993.86

رفتار گسیختگی ماده جی اچ ۴۰۴۹ بر اساس داده‌های مرجع [۲۹] تقریب زده شد. این اطلاعات به شکلی مناسب با ساختار رابطه مونکام-گرانانت است. در جدول ۳ ثوابت رابطه مونکام-گرانانت که از راه برازش منحنی برای این آلیاژ محاسبه شده ارائه شده است.

**جدول (۳):** ثوابت رابطه مونکام-گرانانت برای جی اچ ۴۰۴۹ محاسبه شده بر مبنای داده‌های مرجع [۲۹].

M	C <sub>MG</sub>	K	n	Q	R
۰/۷۲۴	۶/۰۰۱	۶/۶۱×۱۰ <sup>۴</sup>	۸/۳۱۴	۵/۷×۱۰ <sup>۵</sup>	۸/۰۴۳۶

داده‌های تنش-گسیختگی سوپرآلیاژ اینکونل ۷۱۸ در مرجع [۲۸] به صورت رابطه (۵) داده شده است و به همین شکل قابل استفاده است:

$$\log(t_r) + [R_1(T - T_{mid}) + R_2(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_{mid}})] = B + C \log(\sigma) + D\sigma + E(\sigma)^2, \quad (5)$$

که در آن،  $t_r$ ،  $\sigma$  و  $T$  به ترتیب زمان گسیختگی، تنش و دمای نقطه مورد مطالعه هستند. بقیه عوامل، ثابت بوده و در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

از دیگر روابط پیش‌بینی زمان گسیختگی شتاب یافته، رابطه مونکام-گرانانت<sup>۱</sup> است که برای محاسبه آن نیاز به دانستن رابطه نرخ کرنش خزشی در روند پایا بر حسب تنش داریم:

$$t_r \times \dot{\epsilon}_{ss}^M = C_{MG}, \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ss} = K \sigma_a^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right),$$

که در آن،  $\dot{\epsilon}_{ss}$  نرخ کرنش خزش پایا،  $C_{MG}$  ثابت مونکام-گرانانت،  $M$ ،  $K$ ،  $n$  و  $Q$  ثوابتی وابسته به ماده و  $R$  ثابت جهانی گازها است. این ثوابت به روش برازش منحنی از داده‌های تجربی به دست آمده‌اند.

### ۳-۱- خواص خزشی سوپرآلیاژها

آزمون‌های اصلی خزش به دو دسته خزش-گسیختگی<sup>۲</sup> و تنش-گسیختگی<sup>۳</sup> تقسیم شده‌اند. آزمایش‌های خزش-گسیختگی آن دسته از داده‌ها را شامل می‌شوند که رابطه بین تنش، زمان گسیختگی و دمای نمونه را مشخص می‌نمایند. از این آزمایش‌ها، علاوه بر به دست آمدن داده‌های تنش-گسیختگی، داده‌های کرنش بر حسب زمان نیز استخراج شده‌اند. از داده‌های خزش-گسیختگی برای شبیه‌سازی عددی و مدل کردن رفتار خواص مواد استفاده شده است.

در این تحقیق برای مدل‌سازی خزش تابع زمان، مدلی که شامل هر دو قسمت اولیه و ثانویه روند کرنشی خزش بوده و به طرح زمان سختی<sup>۴</sup> معروف است، مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\epsilon_{cr} = \frac{C_1}{C_3 + 1} \sigma^{C_2} t^{C_3 + 1} \exp\left(\frac{-C_4}{T}\right) + C_5 \sigma^{C_6} t \exp\left(\frac{-C_7}{T}\right), \quad (4)$$

که در آن، جمله اول، معادل خزش روند اولیه و جمله دوم مربوط به روند پایا یا ثانویه است.  $C_1$  تا  $C_7$  ثوابتی هستند که به نوع ماده بستگی دارند.  $T$ ،  $t$ ،  $\sigma$  به ترتیب تنش معادل، زمان و دمای مطلق هستند. طرح زمان-سختی اینکونل ۷۱۸ از روی داده‌های مرجع [۲۸] استخراج شده است. جدول ۲

- 1- Monkam-Grant
- 2- Creep-Rupture
- 3- Stress-Rupture
- 4- Time Hardening

انجام شده است. برخلاف آنکه دمای محفظه احتراق تا  $1,200^{\circ}\text{C}$  نیز بالا رفته، اما روکش‌های سرامیکی پره‌ها و مسی‌های عبور سیال خنک‌کننده که داخل پره تعبیه شده‌اند، باعث شده است که در عمل دمای پره بیش‌تر از  $400$  درجه کمتر از حداکثر دمای محوطه احتراق باشد.

#### ۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود و پردازش‌های صورت گرفته روی آن ارائه شده است.

#### ۵-۱- حل گذرا با زمان طولانی

برای بررسی اثر گذشت زمان روی تنش‌ها، رفتار پره توربین تعمیر شده طی  $100$  هزار ساعت (معادل  $11/6$  سال فعال) شبیه‌سازی شد. نتایج تنش فون‌میزز (برحسب مگاپاسکال) که اساسی برای محاسبه طول عمر گسیختگی است، در شکل ۴ (بخشی از حل گذرا) نشان داده شده است. با دقت در این شکل ملاحظه می‌شود با گذر زمان، تنش حداکثر افزایش یافته و محل رویداد آن به سرعت به حاشیه محل تعمیرشدگی منتقل شده است.

#### ۵-۲- قانون جمع آثار آسیب<sup>۲</sup>

از آنجا که با گذشت زمان نقطه بحرانی در هر لحظه در مکان و اندازه تنش حداکثر، جابه‌جا شده، به معیاری نیاز است که آسیب حداکثر پره را وابسته به زمان به‌دست دهد. بدین منظور می‌توان از قانون جمع آسیب‌های مکانیکی استفاده نمود:

$$\sum \frac{t_i}{T_{ri}} = 1, \quad (۴)$$

که در آن  $t_i$  زمانی است که ماده در معرض آسیب مکانیکی  $i$  ام است و  $T_{ri}$  هم زمان گسیختگی ماده در شرایط  $i$  ام است. اما باید دقت نمود که در تحلیل گذرا، تنش‌ها تابع زمان و زمان متغیر مستقل است. از طرفی زمان گسیختگی نیز تابع تنش و دماست، بنابراین:

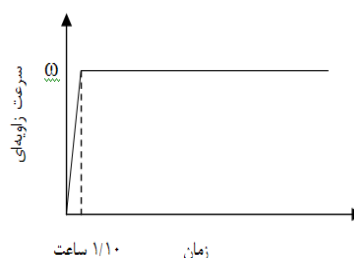
#### جدول (۴): ثوابت رابطه (۵) [۲۸].

$R_1$	$2/145 \times 10^{-3}$
$R_2$	$-5/622 \times 10^{-3}$
$T_{mid}$	۸۶۷
$B$	۹/۶۷
$C$	$-8/99 \times 10^{-1}$
$D$	$-2/71 \times 10^{-3}$

#### ۴- مدل اجزاء محدود

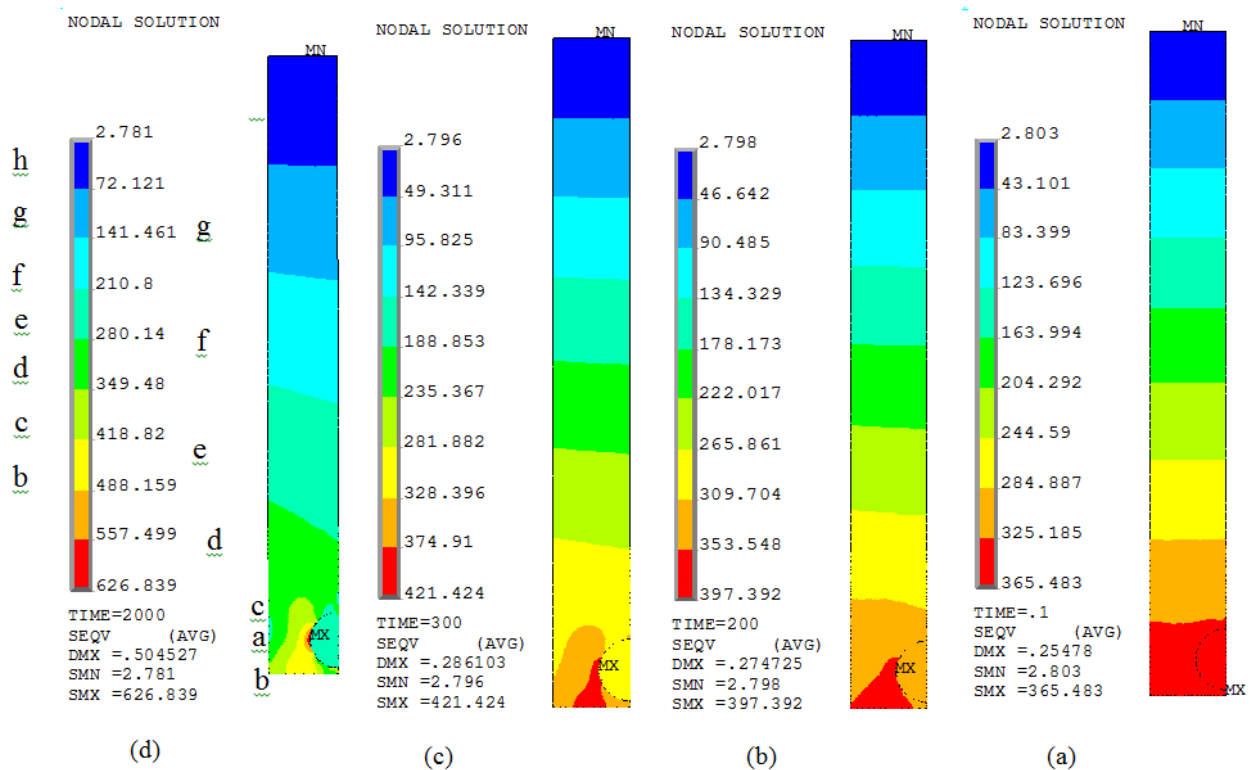
با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲ و با توجه به ضرورت مدل‌سازی دقیق هندسه دایروی ناحیه تعمیر شده، از المان دو بعدی PLANE 182 در بسته نرم‌افزاری انسیس<sup>۱</sup> به همراه گزینه تنش صفحه‌ای استفاده شد. این المان به عنوان المان صفحه‌ای (تنش یا کرنش صفحه‌ای) یا به صورت متقارن محوری استفاده می‌شود. هم‌چنین دارای چهار گره با دو درجه آزادی در هر گره و قابلیت محاسبات پلاستیسیته، هایپرالاستیسیته، تغییر شکل‌های بزرگ، تنش-سختی، کرنش‌های بزرگ و قابلیت فرمولاسیون ترکیبی برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های مواد غیر تراکم‌پذیر الاستوپلاستیک و مواد هایپرالاستیک کاملاً غیر قابل تراکم است.

نیروی گریز از مرکز با توان دوم سرعت دورانی متناسب است. اما زمان افزایش سرعت روتور، نسبت به زمان دوران آن در سرعت نهایی ناچیز بوده و در بررسی پدیده خزش بی‌اثر است. بنابراین، در بارگذاری، سرعت دورانی در مدت زمان کوتاهی به سرعت دائم خواهد رسید (شکل ۳).



شکل (۳): نحوه اعمال بار گریز از مرکز به طرح پره توربین.

با توجه به یکنواخت بودن دمای قطعه و ثابت بودن آن با گذشت زمان، تحلیل در هر دما که همان دمای مرجع است،



شکل (۴): روند تغییرات تنش  $\sigma_{av}$  (MPa) و کانتورهای آن با گذشت زمان پس از بارگذاری (a) و (b) (c) ۲۰۰ (d) ۲۰۰۰ ساعت.

این انتگرال به مقدار ۱ رسید، نقطه شکست، زمان گسیختگی و عمر نهایی پره توربین تعمیر شده بر اساس آن اعلام خواهد شد. برای چند نقطه مشکوک، که در شکل ۱-ج نمایش داده شده است، این انتگرال محاسبه و در شکل ۵ بر حسب زمان برای شرایط خاصی از دما و سرعت دورانی ترسیم شده است.

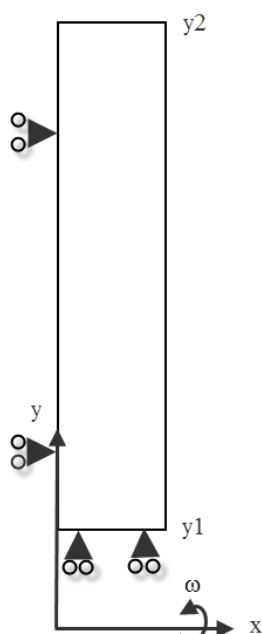
$$\int_0^{t_r} \frac{dt}{T_r} = 1, \quad (8)$$

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، در این شرایط گره ۵۹۹ تعیین‌کننده بحرانی‌ترین نقطه بوده و عمر شکست نیز ۱۹,۷۲۵ ساعت است.

$$\sum \frac{t_i}{T_r(\sigma(t_i))} = 1, \quad (7)$$

که با توجه به پیوستگی زمان و تنش، می‌توان نحوه مجموع آسیب‌ها را به شکل مناسب‌تری، یعنی به صورت انتگرالی نوشت و محاسبه نمود:

که در آن،  $t_r$  بیان‌گر زمان گسیختگی و مقدار آن مجهول است و حل مسئله برابر با یافتن مقدار آن است. بدین منظور برای مدت زمانی که به طور حتم بالاتر از زمان گسیختگی است، یک تحلیل گذرا با زمان، انجام شده است. تنش در نواحی مختلف مواد، استخراج شده و برای نقاطی که احتمال بیش‌تری رفته که عمر کوتاه‌تری داشته باشند، انتگرال فوق به روش عددی محاسبه خواهد شد. اولین نقطه‌ای که برای آن



شکل (۷): شکل یک طرح تعمیر نشده در تنش صفحه‌ای با شرایط مرزی جابجایی و سرعت زاویه‌ای.

$$\sigma_{zz} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \rho b_y = 0.$$

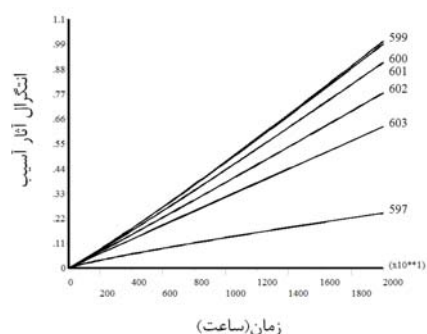
با توجه به شرایط مسئله، انتظار می‌رود تنش‌های  $\sigma_{xx}$  و  $\tau_{xy}$  در مقایسه با  $\sigma_{yy}$  بسیار کوچک‌تر باشند. از اینرو تنها معادله غالب، معادله (۱۰) خواهد بود:

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \rho y \omega^2 = 0, \quad (10)$$

که انتگرال آن، با شرایط مرزی داده شده بر حسب عوامل برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{yy} = -\frac{1}{2} \rho \omega^2 (y^2 - y_2^2). \quad (11)$$

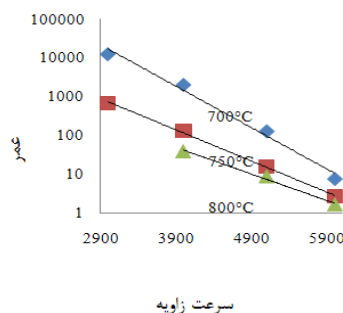
اگر از جدول ۱ مقادیر لازم به‌کار برده شود و فرض شود ماده زمینه جی اچ ۴۰۴۹ ( $\rho = 1440 \text{ kg/m}^3$ ) باشد، در سرعت ۵۱۰۰ دور در دقیقه و دمای ۹۲۰ کلوین، در ریشه پره حداکثر تنش به‌وجود آمده و مقدار آن برابر خواهد بود با:



شکل (۵): مقدار انتگرال آسیب خزش بر حسب زمان در دمای ۹۲۰ درجه کلوین و سرعت زاویه‌ای ۵۱۰۰ دور در دقیقه توربین.

### ۳-۵- پیش‌بینی عمر در دورها و دماهای مختلف کاری

در صورتی که روند استفاده شده در شکل ۶ برای سرعت زاویه‌ای‌های مختلف روتور، در دماهای مختلف تکرار شود، شکل ۶ حاصل خواهد شد. همان‌طور که مشخص است در صورتی که نتایج به‌صورت نیمه‌لگاریتمی رسم شوند، رابطه سرعت زاویه‌ای و عمر، تقریباً خطی خواهد بود. آن‌چنان که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت زاویه‌ای و دمای پره، به شدت عمر کاهش یافته است. گفتنی است که در همه بارگذاری‌ها، بحرانی‌ترین گره چه در ماده زمینه و چه در ماده تعمیر شده، همان گره شماره ۵۹۹ بوده است.



شکل (۶): نمودار عمر پره توربین تعمیر شده بر حسب سرعت زاویه‌ای توربین در دماهای مختلف.

### ۶- محاسبه عمر حالت تعمیر نشده

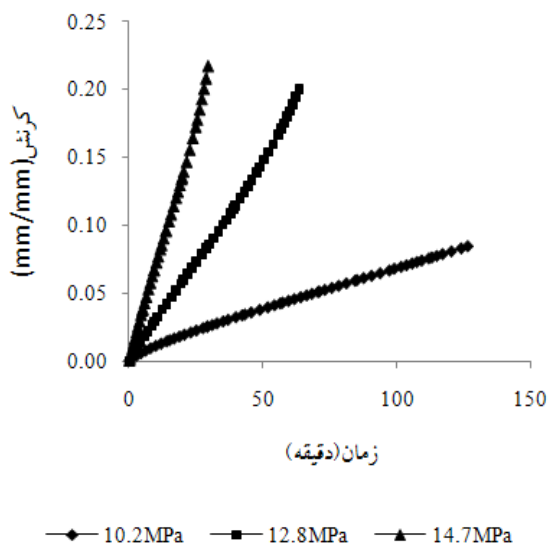
با فرض حالت تنش صفحه‌ای برای هندسه در نظر گرفته شده در شکل ۷ معادلات تعادل پره به‌صورت روابط زیر خواهند بود:



به دلیل زمان‌بر بودن آزمایش‌های خزش، موادی انتخاب شد که در دمای محیط دارای نرخ کرنش مناسب و زمان گسیختگی رضایت‌بخش باشند. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E8M [۳۰] برای آزمون کشش ساده و خزش، تهیه شدند. پس از انجام آزمون کشش ساده و مشخص شدن تنش تسلیم هریک، بارهایی کم‌تر از تنش تسلیم به آن‌ها داده شد. از دستگاه SANTAM STM 150 برای این آزمون استفاده شد. داده‌های کرنش تابع زمان و زمان گسیختگی، برای هر آزمون طبق استاندارد ASTM E139 [۳۱] در مورد آزمون خزش، ثبت شد. منحنی‌های حاصل از آزمون خزش به شکل کرنش خزشی بر حسب زمان برای هر دو ماده در نمودارهای شکل ۹-۸ ارائه شده است. رابطه (۱۲) کرنش خزشی را به صورت تابع زمان و تنش نشان داده است. در صورتی‌که منحنی‌های شکل ۹-۸ بر این اساس برازش شود، ثوابت آن مشابه آنچه در جدول ۶ ارائه شده به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{K\sigma^m t^{n+1}}{n+1}, \quad (12)$$

که در آن،  $n, m, K$  ثوابت وابسته به ماده و  $\sigma, \varepsilon_{cr}$  و  $t$  به-ترتیب نشان‌گر تنش، کرنش خزشی و زمان هستند.



شکل (۸): نمودار کرنش مهندسی بر حسب زمان در تنش‌های مختلف برای سرب خالص.

$$\sigma_{yy} = -\frac{1}{2} \times 8440 \times$$

$$\left(5100 \times \frac{2\pi}{60}\right)^2 (0.588^2 - 0.808^2) = 369 \text{ MPa}.$$

اکنون با جای‌گذاری این مقدار تنش در رابطه مونکام-گرانٹ، مقدار عمر محاسبه شده برای پره توربین تعمیر نشده برابر خواهد بود با:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = 6.61e4 \times 369^{8.314} \times \exp(-570000/8.314/920) = 6.2882e-7$$

$$t_r = 6.001 / (6.2882e-7)^{0.724} = 185,390 \text{ Hr},$$

که عمر بسیار زیادی در این شرایط است. اکنون اگر شرایط مشابه پره تعمیر شده در دما و سرعت زاویه‌ای با این طرح سنجیده شود، نتیجه خواهد شد که تعمیرشدگی با جنس نرم‌تر، منجر به کاهش عمر نزدیک به ۹۰ درصدی عمر پره در اثر خزش خواهد شد.

#### ۷- اعتبارسنجی روش

برای نشان دادن درستی روش پیشنهادی، آزمایشی بر روی دو ماده، یکی نوعی آلیاژ سرب با خلوص بالای ۹۸٪ و دیگری قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪ در دمای اتاق انجام شد. ترکیب شیمیایی حاصل از آزمون کوانتومتری این مواد در جدول ۵ آورده شده است.

جدول (۵): درصد عناصر موجود در آلیاژهای سرب و قلع مورد استفاده در آزمایش‌های عملی.

نام آلیاژ	سرب	قلع ۷۰٪- سرب ۳۰٪
Sn	<1.0	70±0.6
Pb	98.66	29.872±0.6
Sb	0.379	0.02
Bi	0.03	0.01
Cu	0.0167	0.01
Ag	0.0029	0.005
Cd	0.0005	0.001
Zn	0.0087	0.001
Ni	0.001	-
Al	-	0.001
As	-	0.01
Fe	0.0005	0.02
other	-	0.05

## جدول (۶): ضرایب حاصل از آزمایش‌های عملی منعکس

شده در شکل‌های ۸ و ۹ متناسب با معادله (۱۲).

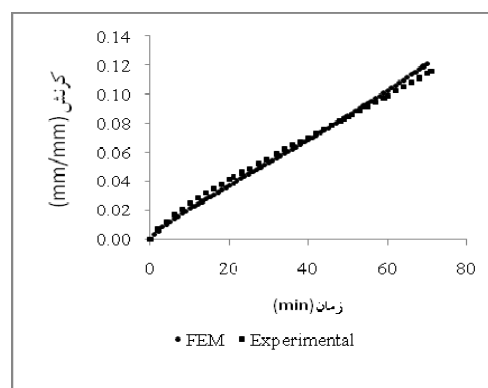
	K	m	n
سرب	$7 \times 10^{-7}$	۳/۲۳۳	-۰/۱۵
قلع-سرب	$6 \times 10^{-12}$	۶/۲۴	-۰/۲۵

هم‌چنین، بر مبنای داده‌های خزش گسیختگی هر کدام از دو ماده، ضرایب رابطه لارسن میلر برای سرب در رابطه (۱۳) و برای قلع-سرب در رابطه (۱۴) محاسبه و ارائه شده‌اند:

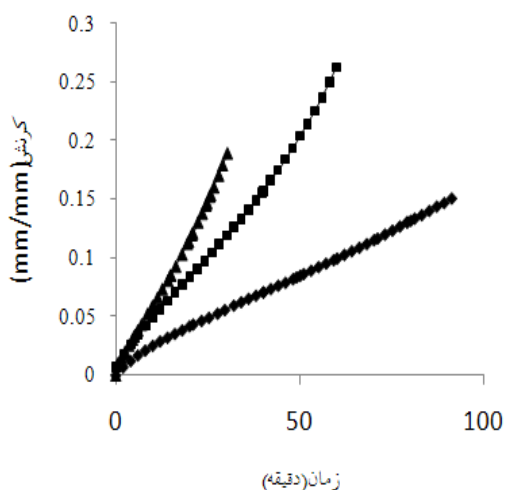
$$\begin{cases} LMP_{Pb} = 298 \times (20 + \log(T_r)), \\ LMP_{Pb} = 9209.9 - 831.4 \ln(\sigma). \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} LMP_{Sn-Pb} = 298 \times (20 + \log(T_r)), \\ LMP_{Sn-Pb} = 8363 - 706.14 \ln(\sigma). \end{cases} \quad (14)$$

برای بررسی دقت ضرایب محاسبه شده در جداول و روابط قبل، ابتدا با تعریف ثوابت گفته شده برای نرم‌افزار، یکی از آزمایش‌ها شبیه‌سازی شد. در شکل ۱۰، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایش‌ها برای یکی از آزمون‌ها بر روی نمونه قلع-سرب ۳۰٪ در تنش ۲۴/۱ مگاپاسکال آورده شده است. از مقایسه بین این نمودارها این نتیجه حاصل شد که طرح حالت روند اولیه با نتایج آزمایشگاهی برابری خوبی دارد.



شکل (۱۰): مقایسه بین کرنش‌های حاصل از آزمایش و کرنش‌های بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود نمونه قلع-سرب ۳۰٪ به شکل یک نمونه تحت آزمایش کشش ساده در تنش ۲۴/۱ مگاپاسکال.



شکل (۹): نمودار منحنی‌های حاصل از کرنش مهندسی خزشی ماده قلع ۷۰٪ سرب ۳۰٪.

در آزمایش اصلی بررسی درستی روش شامل کشش نیز زمان خزشی دو قطعه ساده خطی، تحت بار ثابت است (شکل ۱۱). این دو قطعه به نوعی نمایش‌گر دو المان مجاور هم در نقطه بحرانی (گره ۵۹۹) می‌تواند باشد. در شکل ۱۲ طرح مورد استفاده در محیط نرم‌افزار انسیس نشان داده شده است. این طرح فقط از دو المان خطی تشکیل شده است. از طرفی همه درجات آزادی هر دو المان گرفته شده و از طرف دیگر درجه آزادی جهت عمود هر دو المان یکی شده و بر روی آن بار ثابت قرار گرفته است.

در انجام چنین آزمایشی دو قید اساسی وجود دارد. اولین قید ریاضی مجموعه، جابجایی دو انتهای دو قطعه به مقدار مساوی است. این شرط می‌تواند بر اساس کرنش‌ها نوشته شود. بدین معنی که کرنش دو قطعه در کلیه نقاط با هم برابر است. دومین شرط، محدودیت در تحمل بار توسط دستگاه آزمایش است. در ادامه از شرط اول با عنوان شرط هم‌سازی و دومین با شرط اشباع دستگاه نام برده خواهد شد. بیان ریاضی آن‌ها در معادله (۱۵) (شرط اشباع نبودن) و (۱۶) (شرط هم‌سازی) آمده است:

$$\sigma_{Pb}(t)A_{Pb}(t) + \sigma_{Sn-Pb}(t)A_{Sn-Pb}(t) = F < F_{sat} \quad (15)$$

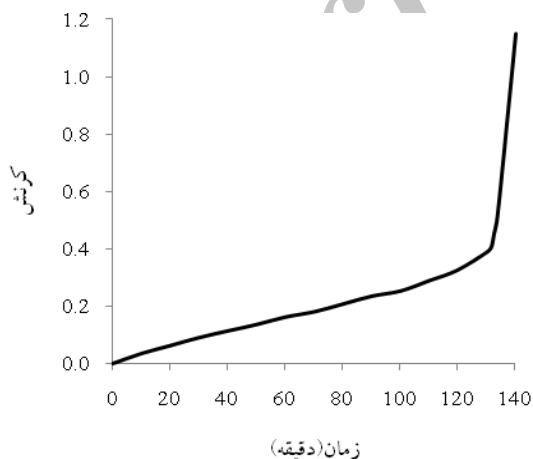
$$\left[ \frac{\sigma(t)}{E} + \varepsilon_{cr}(t) \right]_{Pb} = \left[ \frac{\sigma(t)}{E} + \varepsilon_{cr}(t) \right]_{Sn-Pb} \quad (16)$$

$$A_{pb}(t) = \left[ wt \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cr}(t)}{2} - \nu \frac{\sigma(t)}{E} \right)^2 \right]_{pb}, \quad (17)$$

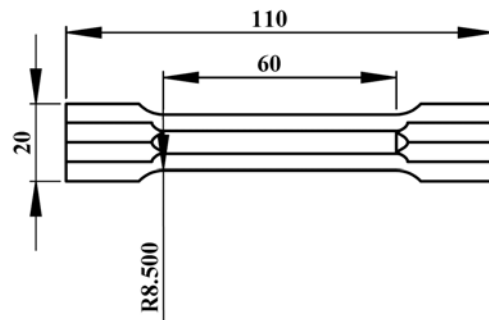
$$A_{sn-pb}(t) = \left[ \frac{\pi}{4} D^2 \left( 1 - \frac{\varepsilon_{cr}(t)}{2} - \nu \frac{\sigma(t)}{E} \right)^2 \right]_{sn-pb},$$

که در آن،  $A$  سطح مقطع،  $w$  عرض مقطع مستطیلی،  $t$  ضخامت نمونه تخت،  $D$  قطر نمونه قلع  $70\%$  - سرب  $30\%$  است. حل هم‌زمان این معادلات غیرخطی برای هر شکل خاص پیچیدگی دارد، بنابراین از نرم افزار انسیس استفاده می‌شود. برای مثال نمونه این مقاله، حل معادلات فوق تا قبل از گلوبی شدن ساده تر است.

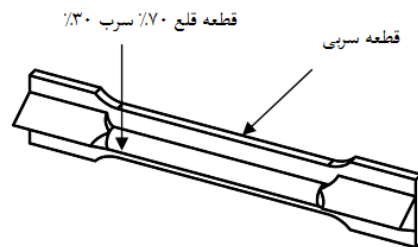
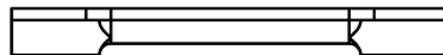
در شکل ۱۳ نتیجه آزمایش در مدت ۱۶۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود یکی از قطعات پس از ۱۳۲ دقیقه (که البته از روی قطعات شکسته شده مشخص است، این قطعه قلع - سرب است) شکسته است. پس از اعمال کدی که برای پیش‌بینی عمر سوپرآلیاژها استفاده شد، برای طرح شکل ۱۳، شکل ۱۴ حاصل شد. طبق این شکل، مقدار انتگرال آسیب خزش بر روی ماده قلع - سرب، پس از گذشت زمان ۱۴۰ دقیقه به مقدار  $1/0.034$  رسید و در همین زمان مقدار انتگرال آسیب برای ماده سرب خالص، به  $0.9794$  رسید. از مقایسه نتایج حاصل از طراحی و آزمایش دیده شد که خطای نسبی پیش‌بینی توسط شبیه‌سازی، در حدود ۶ درصد است.



شکل (۱۳): نتیجه آزمون کشش خزشی مجموعه ارائه شده در شکل ۱۱.

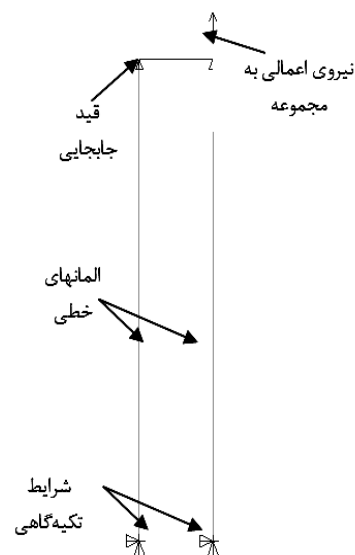


(a)



(b)

شکل (۱۱): مجموعه طراحی شده برای آزمون اعتبارسنجی روش (ابعاد به میلی‌متر) (a) تصویر از جلو (b) تصویر از بالا.



شکل (۱۲): طرح اجزاء محدود متناسب با شکل ۱۱.

برای تکمیل روابط معادلات فوق، قانون حجم ثابت در کرنش پلاستیک (خزشی) به صورت زیر اضافه شده است. یادآور می‌شود این معادلات تا قبل از گلوبی شدن کاراست.

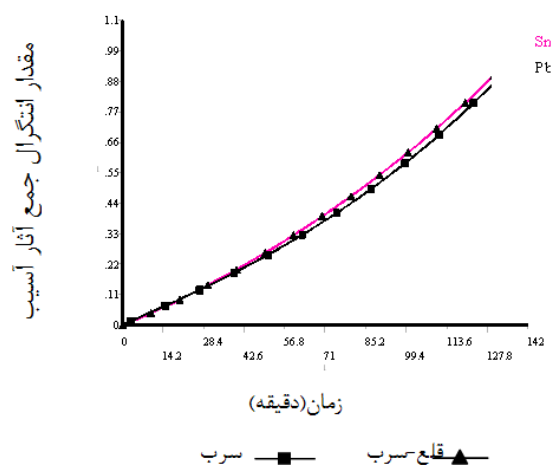
با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان این توصیه عملی را انجام داد که در تعمیر پره‌های توربین صرف انتخاب ماده پرکننده که قابلیت جوش‌پذیری مناسبی با ماده پایه داشته باشد کافی نبوده و لازم است خواص خزشی آلیاژ پرکننده تا حد ممکن به ماده پایه نزدیک باشد.

#### ۹- تقدیر و تشکر

نویسندگان از زحمات همکاران محترم در کارگاه‌های پژوهشی دانشکده مهندسی مکانیک که ابزار تهیه قطعات را در اختیار قرار دادند و آزمایشگاه مکانیکی مواد و کوانتومتری دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان که زحمت انجام آزمون‌های متعدد و طولانی کشش، خزش و تحلیل عناصر را تقبل نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

#### مراجع

1. Carter, T.J. "Common Failures in Gas Turbine Blades", Eng. Failure Analysis, Vol. 12, No. 2, pp. 237-247, 2005.
2. Poursaeidi, A. "Gas Turbine Blade Creep Life Assessment", The 6<sup>th</sup> Annual Mech. Eng. Conf. and the 3<sup>th</sup> Int. Mech. Eng. Conf. Iranian Mech. Eng. society, No. 1, pp. 759-766, 1988.
3. Gandy, D.W., Frederick, G., Viswanathan, R., and Stover, J.T. "Overview of Hot Section Component Repair Methods", ASM Utilities and Energy Sector Conf. on Gas Turbine Materials Tech., St. Louis, Missouri, USA, 2000.
4. Mathew, M.D., Parameswaran, P., and Bhanu Sankara Rao, K. "Microstructural Changes in Alloy 625 During High Temperature Creep", Materials Characterization, Vol. 59, No. 5, pp. 508-513, 2008.
5. Poursaeidi, E., Aienravaie, M., and Mohammadi, M.R. "Failure Analysis of a Second Stage Blade in a Gas Turbine Engine", Eng. Failure Analysis, Vol. 15, No. 8, pp. 1111-1129, 2008.
6. Seon-gab, K., Young-ha, H., Tae-gu, K., and Chang-min, S. "Failure Analysis of j85 Engine Turbine Blades", Eng. Failure Analysis, Vol. 15, No. 4, pp. 394-400, 2008.
7. Brinkman, C. R., et al., "Creep and Creep-Rupture Behavior of Alloy 718", Superalloys 718, 625 and Various Derivatives, Ed: E.A. Loria (Warrendale, PA: TMS, 1991), pp. 519-536.
8. Kim, D.H., Kim, J.H., Sa, J.W., Lee, Y.S., Park, C.K., and Moon, S.I. "Stress Rupture Characteristics of Inconel 718 Alloy for Ramjet



شکل (۱۴): نمودار انگرال آسیب خزش طرح شکل ۱۱.

#### ۸- نتیجه‌گیری

یک طرح ساده دو بعدی تحت نیروی گریز از مرکز برای بررسی اثر خواص ماده در پره‌های تعمیر شده دوجنسی ارائه شد. روابط لارسن-میلر و مونکام-گرانانت برای پیش‌بینی عمر خزشی این طرح به کار رفت و مشخص شد که هماهنگ نبودن در خواص خزشی پس از مدتی باعث تغییر نقطه حداکثر تنش از ریشه پره به مرز اتصال دو ماده خواهد شد. این خاصیت به حدی اثرگذار است که حداقل عمر هر دو ماده در همین نقطه رخ داده است. محاسبه عمر بر اساس قانون جمع آثار آسیب انجام شد. از مقایسه عمر پره سالم با پره تعمیر شده در شرایط مشابه، در نتیجه اختلاف خواص خزشی در نمونه تعمیر شده، کاهش عمر ۹۰ درصدی محاسبه شد. در اعتبارسنجی روش عددی، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی عددی انجام شد. از مقایسه نتایج طرح اجزا محدود تک‌بعدی با نتایج کرنش در آزمون خزش تک‌بعدی برای دو ماده متفاوت سرب و سرب-قلع، درستی بکارگیری قانون جمع آثار آسیب بررسی شد. دو نمونه آزمایش با جنس‌های متفاوت، به صورت ترکیبی و با هم در آزمون خزش-گسیختگی قرار گرفتند. برای پیش‌بینی عمر قطعه مرکب، با استفاده از روش جمع آثار آسیب، در عمرهای محاسبه شده فقط ۶ درصد خطا نسبت به نتیجه آزمون دیده شد.

20. Gallardo, J.M., Rodríguez, J.A., and Herrera, E.J. "Failure of Gas Turbine Blades", *Wear*, Vol. 252, No. 3-4, pp. 264-268, 2002.
21. Khajavi, M. R. and Shariat, M.H. "Failure of First Stage Gas Turbine Blades", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 11, No. 4, pp. 589-597, 2004.
22. Silveira, E., Atxaga, G., Erauzkin, E., and Irisarri, A.M. "Study on the Root Causes for the Premature Failure of an Aircraft Turbine Blade", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 16, No. 2, pp. 639-647, 2009.
23. Hou, J., Wicks, B.J., Antoniou, R.A. "An Investigation of Fatigue Failures of Turbine Blades in a Gas Turbine Engine by Mechanical Analysis", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 9, No. 2, pp. 201-211, 2002.
24. Kubiak Sz.J., Urquiza, G.B., Garcia, J.C., and Sierra, F.E. "Failure Analysis of Steam Turbine Last Stage Blade Tenon and Shroud", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 14, No. 8, pp. 1476-1487, 2007.
25. Wang, W.Z., Xuan, F.Z., Zhu, K.L., and Tu, S.T. "Failure Analysis of the Final Stage Blade in Steam Turbine", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 14, No. 4, pp. 632-641, 2007.
26. Davis, J.R., "Heat-Resistant Materials", *ASM Specialty Hand Book*, ASM Int., 1997.
27. Larson, F.R. and Miller, J. "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 765-775, 1952.
28. Brinkman, C.R., Booker, M.K., and Ding, J.L. "Creep and Creep-Rupture Behavior of Alloy 718", 1991.
29. Chen, L. "Tensile Creep Behavior and Strain-Rate Sensitivity of Superalloy GH4049 at Elevated Temperatures", *Materials Sci. and Eng.: A*, Vol. 527, No. 4-5, pp. 1120-1125, 2010.
30. "ASTM E8M – 00, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", Ed: ASTM Int.
31. "ASTM E139-00, Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials", Ed: ASTM Int., 2003.
9. Rajendran, R. Paik, J.K., Lee, J.M., Chae, Y.H., and Lee, M.S. "Creep Life Prediction of a High Strength Steel Plate", *Mat. & Design*, Vol. 29, No. 2, pp. 427-435, 2008.
10. Vaezi, M. and Soleymani, M. "Creep Life Prediction of Inconel 738 Gas Turbine Blade", *Appl. Sci.*, Vol. 9, No. 1, pp. 1950-1955, 2009.
11. Kermanpour, A., Sepehri-Amin, H., Ziaei-Rad, S., Nourbakhshnia, N., and Mosaddeghfar, M. "Failure Analysis of Ti6Al4V Gas Turbine Compressor Blades", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 15, No. 8, pp. 1052-1064, 2008.
12. Mazur, Z., Garcia-Illescas, R., Aguirre-Romano, J., and Perez-Rodriguez, N. "Steam Turbine Blade Failure Analysis", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 129-141, 2008.
13. Mazur, Z., Garcia-Illescas, R., and Porcayo-Calderon, J. "Last Stage Blades Failure Analysis of a 28 MW Geothermal Turbine", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 16, No. 4, pp. 1020-1032, 2009.
14. Mazur, Z., Luna-Ramírez, A., Juárez-Islas, J.A., and Campos-Amezcuca, A. "Failure Analysis of a Gas Turbine Blade Made of Inconel 738LC Alloy", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 12, No. 3, pp. 474-486, 2005.
15. Vardar, N. and Ekerim, A. "Failure Analysis of Gas Turbine Blades in a Thermal Power Plant", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 14, No. 4, pp. 743-749, 2007.
16. Chen, L., Liu, Y., and Xie, L. "Power-exponent Function Model for Low-cycle Fatigue Life Prediction and Its Applications - Part II: Life Prediction of Turbine Blades under Creep-Fatigue Interaction", *Int. J. Fatigue*, Vol. 29, No. 1, pp. 10-19, 2007.
17. Sabour, M.H., "Creep-fatigue Interaction in Aircraft Gas Turbine Components by Simulation and Testing at Scaled Temperatures", *Mech. and Industrial Eng., Concordia Univ.*, 2005.
18. Tarun, G., "Creep-Fatigue Interactions of Gas Turbine Materials", *Def Sci. J.*, Vol. 38, No. 4, pp. 467-76, 1988.
19. Das, G., Chowdhury, S.G., Ray, A.K., Das, S.K., and Bhattacharya, D.K. "Turbine Blade Failure in a Thermal Power Plant", *Eng. Failure Analysis*, Vol. 10, No. 1, pp. 85-91, 2003.

Archive of SID