



بررسی عددی رفتار خزش پره توربین از جنس سوپرآلیاژ اینکونل 939 با استفاده از مدل‌های مختلف خزش

حجت الله رخ گیره

استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی لارستان، لار
* لار، صندوق پستی 7431813115، rokhgireh@lar.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق رفتار خزش پره توربین گازی ساخته شده از سوپرآلیاژ اینکونل 939 تحت اثر دوران و تنش‌های حرارتی بدست آمده از تحلیل ترموالاستیک بررسی شده است. چهار مدل لارسن-ملیر، اور-شربی-دورن، مانسون-هافر، ام-سی-ام برای تحلیل خزش این سوپرآلیاژ استفاده و نتایج آنها با هم مقایسه شده است. در گام اول ثابت‌های مادی این مدل‌ها با استفاده از برازش چهار مدل بر داده‌های آزمایشگاهی مختلف ارائه شده توسط کاست-50 تعیین شده اند. سپس با استفاده از این ثابت‌های مادی وابسته به دما، مدل اجزای محدود مناسب ایجاد شده و تنش‌های ناشی از توزیع دما و دوران پره تعیین شده اند. محدوده دمایی بدست آمده برای پره در بازه 1050 کلوین تا 1200 کلوین بدست آمد. به دلیل اینکه تنش وان-میزر بدست آمده کمتر از تنش تسلیم اینکونل 939 در بازه دمایی فوق بوده، تحلیل خزش ویسکوالاستیک با زیر روال خزش در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل لارسن-میلر و مدل ام-سی-ام نرخ کرنش خزش کمتر و نتایج دقیقتری را نسبت به دو مدل دیگر پیش‌بینی می‌کنند. همچنین نتایج تحلیل نشان داد خزش در نقاط با دمای بیشتر، اهمیت بیشتری دارد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 24 دی 1400
داوری اولیه: 3 اسفند 1400
پذیرش: 14 اسفند 1400
کلیدواژه‌گان:
سوپرآلیاژ اینکونل 939
خزش
اجزای محدود
پره توربین گازی

Numerical Investigation of Creep Behavior Turbine blade made of Inconel 939 Superalloy with different Creep Models

Hojjatollah Rokhgireh

Mechanical Engineering Department, University of Larestan, Lar, Iran.
P.O.B. 7431813115, Lar, Iran, rokhgireh@lar.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 14 January 2022
First Decision: 22 February 2022
Accepted: 5 arch 2022

Keywords:

Inconel 939 superalloy
Creep
FEM
Gas turbine blade

Abstract

In the present paper, gas turbine blade made of Inconel 939 superalloy creep behavior under rotation and thermal stress which is obtained from thermoelastic analysis is studied. Four models including Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Manson-Hoferd, and Minimum Commitment Method are used for creep analysis and their results are compared. At the first step, material constants of these four models are obtained by curve fitting of experimental results provided by COST-50. Then with use of these temperature dependent material constants, finite element model is created and stress due to temperature distribution and blade rotation is determined. Temperature range of blade is obtained from 1050 K to 1200 K. Because obtained von-Mises stress is below the yield stress of Inconel 939 at above temperature range, viscoelastic creep analysis is done by ABAQUS creep subroutine. Obtained results show that Larson-Miller and Minimum Commitment Method predict lower creep rate and creep strain relative to two other models. Also analysis results show that creep is more important at points with higher temperature.

1- مقدمه

بوده است. در این میان استفاده از آلیاژهای پایه نیکل و کروم با ترکیبات مختلف توسعه داده شد [1]. در میان این آلیاژها، اینکونل 738 و اینکونل 939 دو آلیاژ پرکاربرد در ساخت پره‌های توربین گازی بوده و مقاومت مناسبی در برابر دمای کاری بالا دارند [2]. اینکونل 939 آخرین آلیاژ ساخته شده از خانواده پایه نیکل با کروم بالاست. این آلیاژ استحکام کششی مشابهی با اینکونل 738 پس از مدت زمان سرویس 10000 ساعت را داراست. رفتار مکانیکی سوپرآلیاژ اینکونل 939 در

توربین‌های گازی یکی از مهمترین تجهیزات نیروگاه‌ها و سامانه‌های پیشران هستند که دارای پره‌های چند مرحله‌ای ثابت و متحرک بوده و این پره‌ها تحت دمای بالا و فشار جریان قرار دارند. مهمترین چالش در ساخت آنها استفاده از آلیاژها و فرآیندهای خاص تولید است. از دهه 1950، تمرکز بسیاری از سازندگان توربین‌های گازی بر توسعه موادی با شرایط دمای عملکردی بالاتر، استحکام زیاد، مقاوم در برابر خستگی و خزش

Please cite this article using:

H. Rokhgireh, Numerical Investigation of Creep Behavior Turbine blade made of Inconel 939 Superalloy with different Creep Models, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 51- 59, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از مدل لارسن میلر انجام شده و با استفاده از شبکه عصبی از داده‌های حرارتی و تنش، عمر خزش مدل‌سازی شده است. نتایج عمر خزش بدست آمده شامل 9/7 درصد خطا است.

در این پژوهش ثابت‌های چهار مدل مختلف نیمه تجربی خزش شامل لارسن - میلر، اور - شربی - دورن، مانسون-هافرد و ام - سی - ام برای سوپرآلیاژ اینکونل 939 با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، تعیین شده و سپس نتایج کرنش خزش بدست آمده از این مدل‌ها با هم مقایسه می‌شوند.

این داده‌ها که بسیار گسترده هستند توسط کاست-50 در محدوده دمایی 1050 الی 1200 درجه کلون و محدوده تنش 48 الی 750 مگاپاسکال ارائه شده اند. وجود این داده‌ها موجب شده بتوان مدل‌های مختلفی را کالیبره نموده و ثابت‌ها مادی آن را با دقت زیادی تایید کرد. مقایسه نتایج بدست آمده از این چهار مدل در پیش‌بینی رفتار خزش پره توربین گازی ساخته شده از سوپرآلیاژ اینکونل 939 کمتر مورد بررسی قرار گرفته و در این پژوهش ارائه می‌شود. همچنین تعیین دقیق ثابت‌های خزش مربوط به سوپرآلیاژ اینکونل 939 نیز با داده‌های زیاد جزو موارد بسیار مهم این پژوهش است.

2- مدل رفتاری

در این بخش به بررسی داده‌های آزمایشگاهی و نیز مدل‌های ارائه شده خزش پرداخته خواهد شد. این آزمون‌ها اغلب در قالب برنامه تحقیقاتی کاست 50 در اتحادیه اروپا انجام شده است. خواص از هم گسیختگی خزش برای آلیاژ اینکونل 939 که در این بخش استفاده شده توسط [20] ارائه شده است. پارامتر زمان - دما که با $P(t, T)$ نشان داده می‌شود عبارتی است که با ترکیب زمان و دما مقدار ثابتی را برای سطح مشخص از تنش واماندگی ارائه می‌دهد. این گزاره را می‌توان معادل با رابطه (1) زیر دانست [19].

$$P(t, T) = G(\sigma) \quad (1)$$

که G تابعی از سطح تنش σ است. پارامتر $P(t, T)$ برای چهار مدل ذکر شده توابعی مختلف است که مطابق با رابطه (2) می‌باشد [8-4].

$$P_{LM}(t, T) = T \times [C + \log(t)]$$

$$P_{OSD}(t, T) = \log(t) - \frac{Q}{2.3RT}$$

$$P_{MH}(t, T) = \frac{\log(t) - \log(t_a)}{T - T_a}$$

$$P_{MCM}(t, T) = \log(t) + A \times F(T) \times \log(t) + F(T) \quad (2)$$

مجموع تفاوت کمی با آلیاژ اینکونل 738 دارد و در مجموع می‌توان گفت مقاومت در برابر خوردگی اینکونل 939 از سایر سوپرآلیاژهای این رده بیشتر است. به این دلیل، اینکونل 939 در ساخت پره‌های توربین‌های گازی امروزی کاربرد فراوانی دارد [1]. به دلیل دمای بالا و دوران با سرعت زیاد توربین‌ها، خزش یکی از مهمترین پدیده‌هایی است که باعث تخریب پره‌های توربین می‌شود [3]. خزش عبارتست از ایجاد کرنش برگشت ناپذیر در اثر اعمال تنش و دمای بالا به قطعه که در مدت زمان زیاد منجر به شکست قطعه می‌شود.

مدل‌سازی رفتار خزش آلیاژها و تعیین ثابت‌ها مادی مدل‌های ارائه شده از دیرباز مورد توجه بوده است. پارامترهای زیادی بر رفتار ماده در دمای بالا اثر گذار است. سطح تنش‌های اعمال شده و دمای آلیاژ از جمله مهمترین عوامل اثرگذار بوده که با توجه به این پارامترها، مدل‌های زیادی ارائه شده است. دو رویکرد متفاوت برای مدل‌سازی تخمین عمر خزش در حال حاضر توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است. اولین رویکرد شامل استفاده از مدل‌های نیمه تجربی و دومین رویکرد تخمین عمر خزش با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته است. مدل‌های نیمه تجربی بر اساس برازش رابطه به نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد می‌شوند. از میان مدل‌های نیمه تجربی می‌توان به مدل‌های لارسن - میلر [4، 5]، مدل اور - شربی - دورن [6]، مدل مانسون-هافرد [7] و مدل ام - سی - ام [8] و مدل نورتن [9] اشاره کرد.

مدل‌های مبتنی بر مکانیک آسیب بر اساس تعریف متغیر داخلی آسیب به عنوان کمیته فیزیکی بنا شده که پارامتر آسیب بر اثر اعمال عوامل خارجی، رشد می‌کند. مدل‌های مختلف آسیب خزش توسط محققین مختلفی ارائه و توسعه داده شده است [9-12].

مدل‌سازی خزش پره‌های توربین گازی به عنوان مهمترین مکانیزم شکست پره، توسط بسیاری از محققین انجام شده است [13-18]. این مدل‌سازی‌ها شامل استفاده از مکانیک آسیب پیوسته [13-16] و استفاده از روابط نیمه تجربی [17]، [18] است.

کرنش خزش و نرخ کرنش خزش یک پره توربین گازی با استفاده از مدل توانی نورتن توسط [17] انجام شده است. نتیجه بدست آمده برای پره نشان داده که نقطه بحرانی خزش در بیشترین سطح تنش اتفاق نمی‌افتد. همچنین با گذشت زمان تنش‌های پره به دلیل کرنش برگشت ناپذیر خزش، به مرور زمان کاهش می‌یابد. همچنین [18] مدل‌سازی خزش پره با استفاده

$$\frac{\log(t) - 25.06}{T} =$$

$$G_{MH}(\sigma) = \begin{cases} 0.0314 - 0.01873 \times \log(\sigma) - \frac{1.672}{\sigma} & \sigma > \sigma_m \\ -0.01323 - 0.002357 \times \log(\sigma) - 4.725 \times 10^{-6} \times \sigma & \sigma < \sigma_m \end{cases}$$

$$\log(t) + F(T) \times [1 - 0.051 \times \log(t)] =$$

$$G_{MCM}(\sigma) = \begin{cases} 11.765 - 3.332 \times \log(\sigma) - 0.003619 \times \sigma & \sigma > \sigma_m \\ 48.85 - 16.89 \times \log(\sigma) - \frac{1382}{\sigma} & \sigma < \sigma_m \end{cases}$$

$$F(T) = 2.91 \times 10^{-2} \times (T - 1123) + 8863.34 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1123} \right)$$

(5)

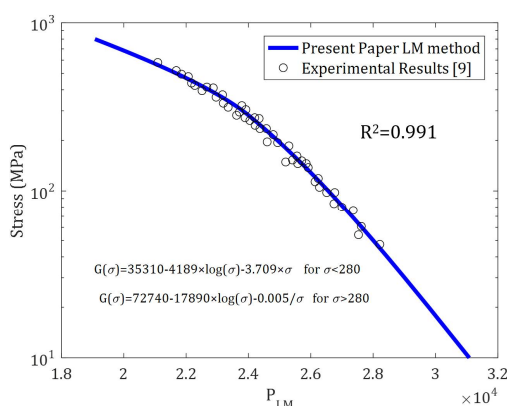


Fig. 1 Comparison of fitted curve with experimental results for Larson-Miller Model

شکل 1 مقایسه منحنی برازش شده مدل لارسن-میلر با نتایج آزمایشگاهی

برای سایر مدل‌ها نیز این برازش با دقت زیاد انجام شده است. در تمام منحنی‌ها و روابط، تنش بر حسب مگاپاسکال، زمان بر حسب ساعت و دما بر حسب کلوین است. نتایج آزمایشگاهی منحنی‌های تنش بر حسب زمان شکست در دمای ثابت همراه با برازش انجام شده در این پژوهش، برای مدل آر-شربی - دورن در شکل 2 نشان داده شده است.

برای مقایسه منحنی زمان شکست - تنش، در دو دمای 1005 کلوین و 1252 کلوین (کران پایین و بالای نتایج آزمایشگاهی) این چهار مدل در شکل 3 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

ملاحظه می‌شود مدل ام-سی - ام انطباق بهتری را نسبت به سایر مدل‌ها به داده‌های آزمایشگاهی دارد. در شبیه سازی خزش در نرم افزارهای اجزای محدود لازم است رابطه کرنش، زمان تعیین شود. در آلیاژهایی که درصد کروم آنها بیش از 13 درصد است ناحیه دوم خزش نسبت به سایر بزرگتر از نواحی

که در رابطه فوق $P_{LM}(t, T)$ پارامتر زمان - دمای لارسن - میلر، $P_{OSD}(t, T)$ پارامتر زمان - دمای آر - شرابی - دورن، $P_{MH}(t, T)$ پارامتر زمان - دمای مانسون - هافرد و $P_{MCM}(t, T)$ پارامتر زمان - دمای مدل ام - سی - ام است. در رابطه فوق t_a, T_a, C ثابت‌ها مادی بوده، R ثابت جهانی گازها و Q انرژی فعال سازی خزش در عنصر پایه آلیاژ است. در مدل ام - سی - ام تابع $F(T)$ به صورت زیر است [8].

$$F(T) = R_1 \times (T - T_m) + R_2 \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right) \quad (3)$$

که T_m تقریباً برابر با دمای میانی (حدود 1123 کلوین) در نظر گرفته می‌شود. مزیت عمده مدل ام - سی - ام کاهش خطا در برون یابی است. تابع $G(\sigma)$ به صورت زیر در نظر گرفته شده است [20].

$$G(\sigma) = A' + B' \times \log(\sigma) + C' \times \sigma \quad \text{for } \sigma < \sigma_m$$

$$G(\sigma) = A + B \times \log(\sigma) + \frac{C}{\sigma} \quad \text{for } \sigma > \sigma_m \quad (4)$$

که مقدار σ_m نیز برابر با 280 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است [20]. تنش‌های اعمال شده در آزمایش خزش بر حسب پارامترهای زمان - دمای مختلف به عنوان منحنی مرجع در نظر گرفته می‌شود. از مجموعه این داده‌ها، ثابت‌های مربوط به تابع $G(\sigma)$ را با برازش منحنی، می‌توان بدست آورد. برای این چهار مدل مختلف پس از برازش مجدد رابطه با داده‌های آزمایشگاهی، رابطه (5) بدست آمده است. ثابت‌ها بر اساس واحد ساعت برای زمان و مگاپاسکال برای تنش تعیین شده‌اند. با انجام برازش مجدد منحنی، ثوابت مادی بدست آمده نسبت به نتایج [20] اصلاح شده و انطباق بهتری را نشان می‌دهد. مقدار مجذور خطای برازش (R^2) برازش انجام شده در پژوهش حاضر برای منحنی اصلی خزش (شکل 1) برای هر چهار مدل حدود 0/99 و در [20] این مقدار حدود 0/97 است.

شکل 1 برازش مجدد انجام شده برای منحنی مرجع برای مدل لارسن - میلر را نشان می‌دهد.

$$T \times [18.95 + \log(t)] =$$

$$G_{LM}(\sigma) = \begin{cases} 72740 - 17890 \times \log(\sigma) - \frac{1383200}{\sigma} & \sigma > \sigma_m \\ 35314 - 4182 \times \log(\sigma) - 3.704 \times \sigma & \sigma < \sigma_m \end{cases}$$

$$\log(t) - \frac{23273}{T} =$$

$$G_{OSD}(\sigma) = \begin{cases} 33.98 - 19.47 \times \log(\sigma) - \frac{1633.3}{\sigma} & \sigma > \sigma_m \\ -11.35 - 2.74 \times \log(\sigma) - 0.0052 \times \sigma & \sigma < \sigma_m \end{cases}$$

مقدار α نزدیک به 1 در نظر گرفته می‌شود [20]. می‌توان با استفاده از روابط (5) و (6) نرخ کرنش را تعیین نمود. زمانش شکست در مدل‌های مختلف با استفاده از رابطه (7) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} (t_r)_{LM} &= 10^{\left(\frac{G_{LM}(\sigma)}{T} - 18.92\right)} \\ (t_r)_{OSD} &= 10^{\left(G_{OSD}(\sigma) + \frac{23278}{T}\right)} \\ (t_r)_{MH} &= 10^{(T \times G_{MH}(\sigma) + 25.08)} \\ (t_r)_{MCM} &= 10^{\left(\frac{G_{MCM}(\sigma) - F(T)}{1 - 0.05 \times F(T)}\right)} \end{aligned} \quad (7)$$

بر اساس داده‌های مربوط به زمان از هم گسیختگی بر حسب نرخ کرنش ناحیه دوم خزش برای آلیاژ اینکونل 939 داده شده توسط [23]، مقادیر C و α به ترتیب برابر با 1/7406 و 0/7581 در نظر گرفته شده است.

بر این اساس، نرخ کرنش خزش در ناحیه دوم را می‌توان با استفاده از رابطه مانکنم - گرت و زمان شکست داده شده در رابطه (7) تعیین نمود. رویه‌های نشان داده شده در شکل 4، مقایسه نرخ کرنش خزش بر حسب تنش و دما را برای چهار مدل مورد مطالعه نشان می‌دهد.

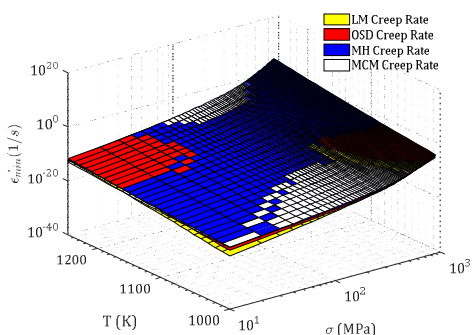


Fig. 5 Comparison of strain rate vs. stress and temperature for different creep models

شکل 4 مقایسه نرخ کرنش خزش بر حسب تنش و دما برای مدل‌های مختلف خزش

برای مقایسه بهتر، داده‌های آزمایشگاهی نرخ کرنش بر حسب تنش اعمالی در دمای 850 درجه سلیسیوس [24] بررسی شده و مقایسه چهار مدل مذکور با داده‌های آزمایشگاهی در شکل 6 نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل 5 فوق مشخص است، این مدل‌ها نتایج بسیار نزدیکی را نشان می‌دهند. با بررسی دقیقتر این نمودار، مشخص می‌شود به صورت کلی نرخ کرنش بدست آمده به ترتیب از کمتر به بیشتر عبارتست از: مدل ایم - سی - ایم، مدل

دیگر بوده و بنابراین مدت زمان از هم گسیختگی تقریباً برابر با زمان ناحیه دوم خزش است. در این ناحیه نرخ کرنش خزش مینیمم است. بنابراین با داشتن نرخ کرنش در ناحیه دوم (که نرخ کرنش تقریباً ثابت است)، می‌توان در نرم‌افزارهای تجاری، پدیده خزش را مدل‌سازی کرد [20]

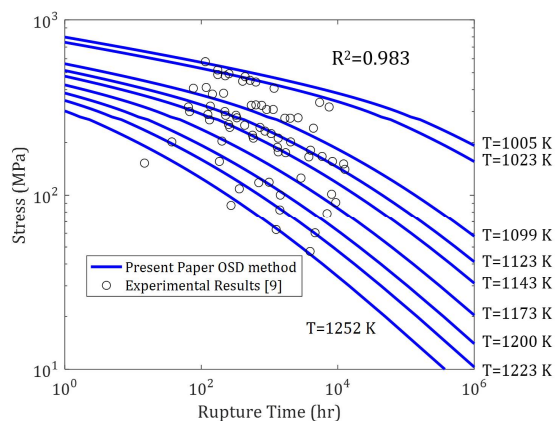


Fig. 2 Stress vs rupture time at different temperature

شکل 2 منحنی تنش بر حسب زمانش از هم گسیختگی در دماهای مختلف

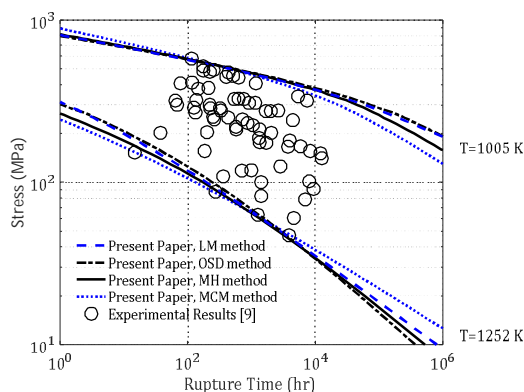


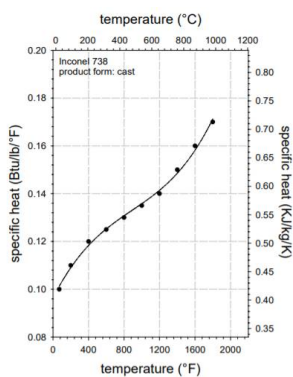
Fig. 3 Stress vs rupture time at different temperature for different models with experimental results

شکل 3 مقایسه منحنی تنش - زمان شکست مدل‌های مختلف خزش با نتایج آزمایشگاهی

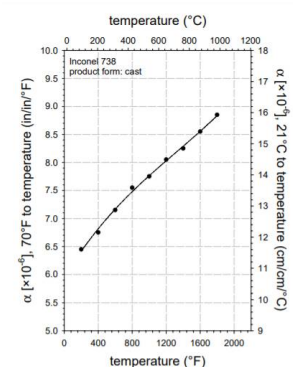
با توجه به اینکه داده‌های موجود در مراجع، اغلب تنش بر حسب زمان از هم گسیختگی داده شده است، نیاز است از این داده‌ها نرخ کرنش خزش را در ناحیه دوم بدست آورد. برای این منظور مانکنم و گرت رابطه‌ای را برای تعیین نرخ کرنش خزش با استفاده از زمان شکست مطابق با رابطه (6) ارائه است [21].

$$t_r \epsilon^\alpha = C \quad (6)$$

که t_r زمان از هم گسیختگی و C ثابت مادی غیر وابسته به دما و تنش است. در مراجع مختلف برای سوپرآلیاژهای اینکونل



(ب)



(ج)

Fig. 6 Thermal properties of Inconel 738, a) Thermal conductivity, b) Specific heat, c) Thermal expansion

شکل 6 خواص حرارتی اینکونل 738، الف) ضریب هدایت گرمایی، ب) ظرفیت گرمایی ویژه، ج) ضریب انبساط حرارتی

این خواص وابسته به دما بوده و در نرم افزار آباکوس خواص حرارتی بر حسب دما اعمال شده است.

4- مدل سازی پره توربین

در این بخش به بررسی عددی خزش پره توربین گازی ساخته شده از سوپرآلیاژ اینکونل 939 پرداخته می شود. برای این منظور در نرم افزار آباکوس مدل ترموویسکو الاستیک غیر کوپل با تحلیل حرارتی ایجاد شده و با استفاده از زیرروال خزش چهار مدل مورد بررسی این مقاله به عنوان مدل خزش ویسکو الاستیک اعمال می شود. ثابت ها مادی خزش با توجه به روابط بخش 2 در نظر گرفته شده است. توربین دارای 20 پره بوده که هر پره دارای یک مجرای خنک کننده است. هندسه پره توربین مطابق با شکل 7 است.

4-1- مدل سازی حرارتی پره

هوا با دمای 1200 کلوین از بین پرها جریان می یابد و سیال خنک کننده نیز با دمای 850 کلوین از مجرای خنک کننده پره عبور می کند. بنابراین برای این دو سطح، شرایط مرزی همرفت

لارسن- میلر، مدل مانسون-هافرد و مدل اور- شربی- دورن. بنابراین با در نظر گرفتن مدل اور- شربی- دورن و مانسون- هافرد نتایج بدست آمده برای نرخ کرنش شکست بزرگتر بوده و در نتیجه زمان شکست کمتر پیش بینی می شود. بنابراین این دو مدل نتایج محافظه کارانه تری را نشان می دهند. مخصوصاً در تنش زیاد، میزان واگرایی از نتایج آزمایشگاهی برای مدل های اور- شربی- دورن و مانسون-هافرد زیاد می شود.

3- خواص حرارتی سوپرآلیاژ اینکونل 939

برای مدل سازی در نرم افزار آباکوس، نیاز به خواص حرارتی اینکونل 939 بر حسب دما است. خواص حرارتی مورد نیاز شامل ضریب هدایت گرمایی، ضریب انبساط حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه است. مرجع [25] این خواص را برای اینکونل 738 که داده های بسیار نزدیکی به اینکونل 939 دارد را ارائه کرده است. لازم به ذکر است برای خانواده سوپرآلیاژهای پایه نیکل تقریباً این خواص یکسان هستند [25]. شکل 6 این خواص را بر حسب دما نشان می دهد.

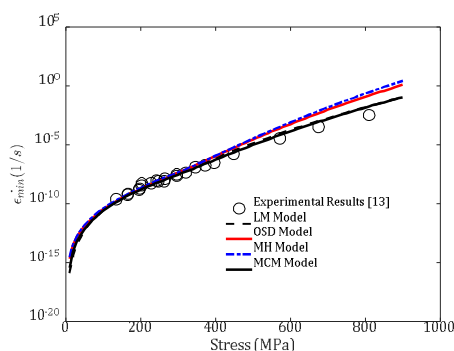
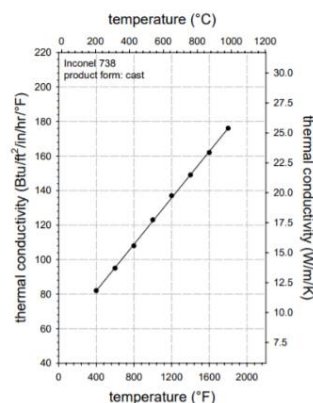


Fig. 5 Comparison of creep strain rate of different models and experimental results in 850°C

شکل 5 مقایسه مقادیر نرخ کرنش خزش مدل های مختلف در دمای 850 درجه سلیسیوس با نتایج آزمایشگاهی



(الف)

شکل 9 نمودار تنش بدست آمده از تحلیل ترموالاستیک در یکی از نقاط پره بر اساس تعداد المان را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار برای رسیدن به شرایط استقلال از شبکه، تعداد 98617 المان در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است استقلال از شبکه برای حل مسئله حرارتی، تعداد کمتری المان را نتیجه می‌دهد که در پژوهش حاضر استقلال از شبکه حل ترموالاستیک مد نظر قرار گرفته است.

شکل 10 توزیع دمای پره به همراه کانتورهای دما ثابت را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود دما به دلیل نبود مجرای خنک کننده در انتهای ایرفویل، در قسمت لبه انتهایی ایرفویل بیشه است. محدوده دمای بدست آمده از 1048 کلوین تا 1194 کلوین است.

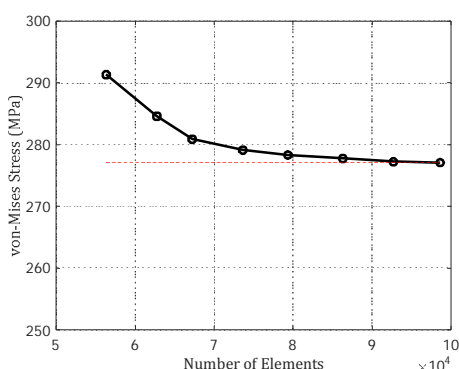


Fig. 9 Von-Mises stress vs number of element in a point of blade

شکل 9 تنش وان - میزز یک نقطه از پره بر حسب تعداد المان

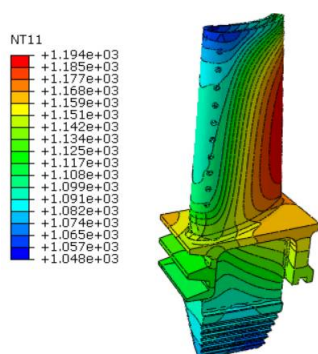


Fig. 10 Blade temperature field

شکل 10 توزیع دمای پره

2-4- مدل سازی خزش

خواص الاستیک سوپرآلیاژ اینکونل 939 بر حسب دما متغیر است. تغییرات مدول یانگ این سوپرآلیاژ در شکل 11 نشان داده شده است [25].

بارگذاری پره شامل بارگذاری حرارتی و اثرات دورانی پره است. سرعت دورانی پره برابر با 2000 دور بر دقیقه در نظر

با دمای $T_{\infty} = 1200 K$ در جدار بیرونی و $T_{\infty} = 850 K$ در مجرای داخلی در نظر گرفته می‌شود. ضرب همرفت به جریان سیال، هندسه مرز، سرعت عبور جریان، سرعت دوران پره و دما بستگی دارد. با توجه به پیچیدگی جریان سیال، ضریب همرفت برابر با 400 (وات بر متر بر درجه کلوین) در نظر گرفته شده است [26]. برای انجام تحلیل حرارتی از 98617 المان چهاروجهی مرتبه دو استفاده شده است. مش بندی ناحیه به مطابق با شکل 8 است.

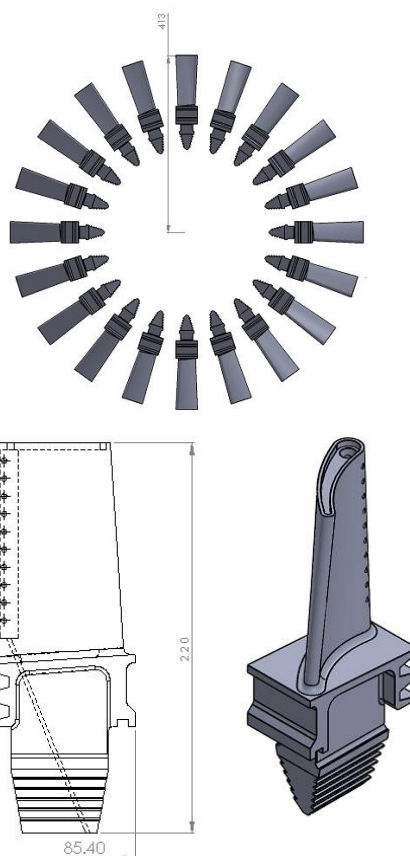


Fig. 7 Geometry of turbine blade

شکل 7 هندسه پره توربین



Fig. 8 Turbine blade mesh after study of mesh dependency

شکل 8 مش بندی پره توربین پس از بررسی استقلال از مش

ایرفویل، نقطه بحرانی خزش پره در این ناحیه اتفاق می‌افتد. کانتور کرنش تجمعی خزش بر حسب زمان بدست آمده از مدل لارسن-میلر در شکل 13 نشان داده شده است. نمودار شکل 14 مقایسه کرنش تجمعی خزش و تنش ویسکوپلاستیک خزش را در نقطه A نشان داده شده در شکل 13 را نشان می‌دهد.

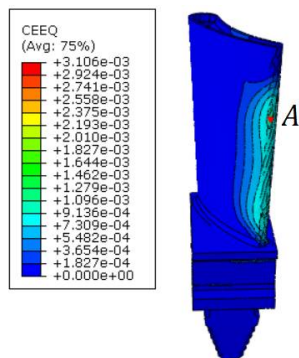


Fig. 13 Equivalent creep strain for Larson-Miller model after 150000 hours

شکل 13 کانتور کرنش معادل خزش، بدست آمده از مدل لارسن-میلر پس از 150 هزار ساعت

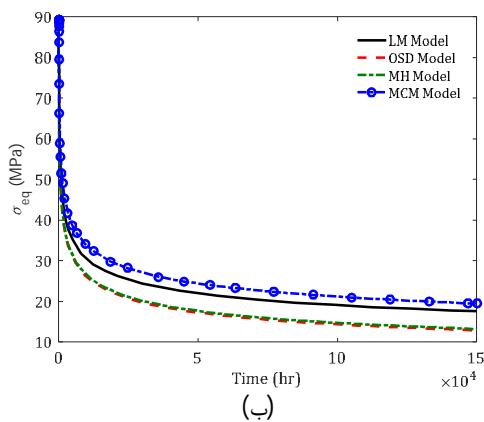
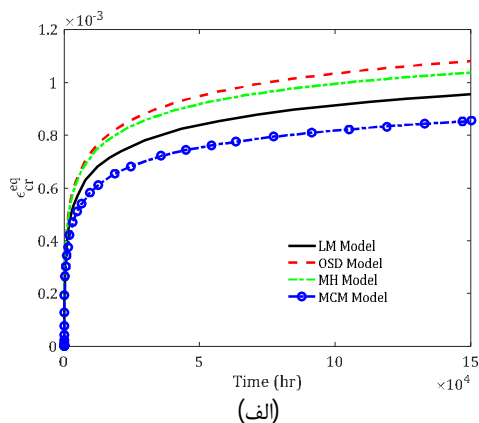


Fig. 14 a) Comparison of equivalent creep strain for different models, b) Comparison of von-Mises stress for different models at point A

شکل 14 الف) مقایسه کرنش معادل خزش بدست آمده از مدل‌های مختلف در نقطه A، ب) مقایسه تنش معادل وان میز بدست آمده از چهار مدل در نقطه A

گرفته شده و بارگذاری حرارتی از بخش قبل به مدل استاتیک اعمال می‌شود. مش بندی ناحیه منطبق بر مش بندی تحلیل حرارتی در نظر گرفته شده است. شکل 12 کانتور تنش وان-میز بدست آمده از تحلیل استاتیک را نشان می‌دهد.

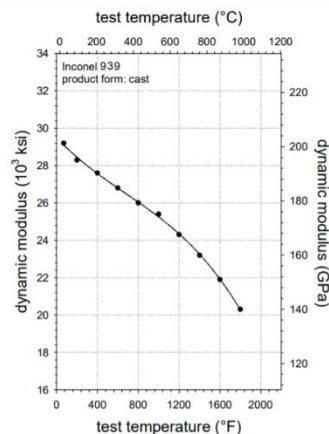


Fig. 11 Young's modulus of Inconel 939 vs temperature [14]

شکل 11 تغییرات مدول یانگ اینکونل 939 بر حسب دما [14]

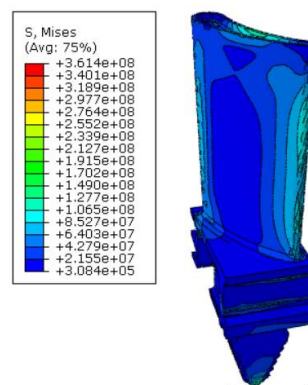


Fig. 12 Von-Mises stress contour obtained from static analysis with centrifugal force and temperature field

شکل 12 کانتور تنش وان میز بدست آمده از تحلیل استاتیک با در نظر گرفتن شتاب دورانی و میدان دما

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تنش وان-میز بدست آمده حداکثر 360 مگاپاسکال بوده که از تنش تسلیم اینکونل 939 در محدوده دمایی بدست آمده کمتر است. تنش تسلیم آلیاژ سوپرآلیاژ اینکونل 939 در دمای 1200 کلوین برابر با 532 مگاپاسکال است [20].

با استفاده از داده‌های تحلیل حرارتی و تحلیل استاتیک، تحلیل ویسکوپلاستیک خزش با داده‌های استخراج شده از بخش 2 انجام شده است. شرایط مرزی هندسی پره شامل ثابت بودن ریشه پره است. با توجه به اینکه زمان عمر تقریبی پره بین 100 هزار تا 150 هزار ساعت [17] است، زمان در نظر گرفته شده 150 هزار ساعت است. به دلیل دمای بالا و عدم وجود خنک کننده در لبه انتهایی

کمترین کرنش را مدل ام-سی-ام و بیشترین کرنش را مدل اور-شربی-دورن پیش‌بینی می‌کند.

6- مراجع

- [1] W. Betteridge, S.W.K. Shaw, Development of superalloys, *Materials Science and Technology*, 3 (1987) 682-694.
- [2] W. Hoffelner, High-cycle fatigue-life of the cast nickel base-superalloys in 738 LC and IN 939, *Metallurgical Transactions A*, 13 (1982) 1245-1255.
- [3] M. Azadi, M. Azadi, Evaluation of high-temperature creep behavior in Inconel-713C nickel-based superalloy considering effects of stress levels, *Materials Science and Engineering: A*, 689 (2017) 298-305.
- [4] F. Larson, J. Miller, A time-temperature relationship for rupture and creep stresses, *Trans. ASME*, 74 (1952) 223-249.
- [5] A. Loghman, M. Moradi, Creep damage and life assessment of thick-walled spherical reactor using Larson–Miller parameter, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 151 (2017) 11-19.
- [6] O.S. R. Orr, J. Dorn, Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures, *Trans. ASM*, (1963) 46.
- [7] S.S. Manson, A.M. Haferd, A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress-rupture data, in, *NACA Technical Note 2890*, (1953), pp. 1-51.
- [8] A C.R. Ensign, S.S. Manson, A specialized model for analysis of creep-rupture data by the minimum commitment, station-function approach, in, (1971).
- [9] F.H. Norton, *The Creep of Steels at High Temperature*, 1 ed., McGraw-Hill, 1929.
- [10] Murakami S. *Continuum damage mechanics*. Netherlands: Springer; 2012
- [11] J. L. Chaboche. *Continuous damage mechanics-a tool to describe phenomena before crack initiation*. *Nuclear Engineering Design*, (1981) 64 233-47.
- [12] Lemaitre J. *A course on damage mechanics*. Netherlands, Springer; 1996.
- [13] N. Zhao, A. Roy, W. Wang, L. Zhao, V.V. Silberschmidt, Coupling crystal plasticity and continuum damage mechanics for creep assessment in Cr-based power-plant steel, *Mechanics of Materials*, 130 (2019) 29-38.
- [14] J. Huo, D. Sun, H. Wu, W. Wang, I. Xue, Multi-axis low-cycle creep/fatigue life prediction of high-pressure turbine blades based on a new critical plane damage parameter, *Engineering Failure Analysis*, 106 (2019) 104159.
- [15] A. Loghman, M. Moradi, Creep damage and life assessment of thick-walled spherical reactor using Larson–Miller parameter, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 151 (2017) 11-19.
- [16] A. Nayebi, H. Ranjbar, H. Rokhgireh, Analysis of unified continuum damage mechanics model of gas turbine rotor steel: Life assessment, *Proceedings of*

ملاحظه می‌شود مطابق انتظار، مدل‌های مانسون-هافرد و اور-شربی-دورن نرخ کرنش بیشتر و در نتیجه کرنش خزش بیشتری را نسبت به مدل لارسن-میلر و مدل ام-سی-ام نتیجه می‌دهند. همچنین مدل‌های اور-شربی-دورن و مانسون-هافرد تنش ویسکوز را سریعتر رهاسازی کرده و در نتیجه سطح تنش‌های کمتری را نسبت به دو مدل دیگر پیش‌بینی می‌کند. این رها سازی بیشتر تنش در دو مدل مانسون-هافرد و اور-شربی-دورن به دلیل کرنش بیشتر خزش و در نتیجه کاهش کرنش الاستیک است.

مدل ام-سی-ام کرنش خزش پس از 150 هزار ساعت را حدود 0/08 درصد و مدل اور-شربی-دورن حدود 0/11 درصد پیش‌بینی می‌کنند. ادیبیگ [17] نیز کرنش خزش پره را با استفاده از مدل نورتن در نقطه انتهای ایرفویل پره برای اینکونل 938 پس از 150 هزار ساعت را برابر با 0/09 درصد تخمین می‌زند. همچنین تنش ویسکوالاستیک پس از 150 هزار ساعت در همین نقطه حدود 42 مگاپاسکال است که با نتایج بدست آمده در این تحقیق مطابقت نسبی دارد.

5- نتیجه گیری

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، ثابت‌ها مربوط به چهار مدل خزش لارسن-میلر، اور-شربی-دورن، مانسون-هافرد و ام-سی-ام با استفاده از برازش منحنی اصلاح شد. پس از آن با استفاده از رابطه مانکنم-گرنر نرخ کرنش مینیمم خزش تعیین شد. با استفاده از زیرروال خزش در نرم‌افزار آباکوس، این چهار مدل به عنوان مدل‌های مادی خزش جهت تحلیل پره توربین گازی بکار رفت. تحلیل غیر کوپل ترمو-الاستو ویسکوپلاستیک برای تخمین کرنش خزش پس از 150 هزار ساعت انجام شد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل ام-سی-ام و لارسون-میلر نرخ کرنش کمتر و در نتیجه کرنش خزش کمتری را نسبت به دو مدل دیگر از خود نشان می‌دهد. همچنین تنش ویسکوز بدست آمده از دو مدل اور-شربی-دورن و مانسون-هافرد به نسبت دو مدل دیگر با گذر زمان بیشتر دچار رهاسازی شده و در انتهای حل، سطح تنش‌های کمتری را نشان می‌دهد. همچنین نتایج پیش‌بینی کرنش خزش نشان داد در نقطه انتهای ایرفویل پره بیشترین نرخ کرنش خزش اتفاق می‌افتد. در این نقطه بیشترین دما وجود داشته اما سطح تنش در این نقطه بیشینه نیست. کرنش خزش بدست آمده توسط چهار مدل پس از 150 هزار ساعت بین 0/08 درصد و 0/11 درصد است که

- relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests, in: ASTM, ASTM, 1956, pp. 593-620.
- [22] E.I. Samuel, B.K. Choudhary, D.P.R. Palaparti, M.D. Mathew, Creep Deformation and Rupture Behaviour of P92 Steel at 923K, *Procedia Engineering*, 55 (2013) 64-69.
- [23] A.K. Koul, R. Castillo, K. Willett, Creep life predictions in nickel-based superalloys, *Materials Science and Engineering*, 66 (1984) 213-226.
- [24] B. Buchmayr, W. Hoffelner, Some Interactions of Creep and Fatigue in IN 738 LC at 850°C, in, 1982.
- [25] Epri, Gas Turbine Blade Superalloy Material Property Handbook, in: Inconel 939, EPRI, 2001, pp. 1-18.
- [26] D. Liu, H. Li, Y. Liu, Numerical Simulation of Creep Damage and Life Prediction of Superalloy Turbine Blade, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015 (2015) 732502.
- the Institution of Mechanical Engineers, Part L: *Journal of Materials: Design and Applications*, 227 (2012) 216-225.
- [17] F. Vakili-Tahami, M.R. Adibeig, Investigating the possibility of replacing IN 738LC gas turbine blades with IN 718, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29 (2015) 4167-4178.
- [18] S. Sanaye, S. Hosseini, Prediction of blade life cycle for an industrial gas turbine at off-design conditions by applying thermodynamics, turbo-machinery and artificial neural network models, *Energy Reports*, 6 (2020) 1268-1285.
- [19] S.S. Manson: "Time-Temperature parameters: A reevaluation and some new approaches", ASM Publication, June, (1969).
- [20] E. Campo, D. Ferrara, S. Quaranta, Analysis of Creep Rupture Data of Nimocast Alloy 739, in: R. Brunetaud, D. Coutsouradis, T.B. Gibbons, Y. Lindblom, D.B. Meadowcroft, R. Stickler (Eds.) *High Temperature Alloys for Gas Turbines 1982*, Springer Netherlands, Dordrecht, 1982, pp. 575-588.
- [21] F.C. Monkman, N.J. Grant, Grant, An empirical