



تحلیل خزش وابسته به زمان و پیش بینی عمر خزشی استوانه‌های چرخان توخالی ساخته شده از فولاد آلیاژی به کمک معادله ساختاری گستره تتا و پارامتر شکست لارسن میلر

هادی محمدی هویه^{۱*}، مهدی صفری^۲، عباس لقمان^۳

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، گرمسار، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۲ مهر ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۵ فروردین ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۷ مرداد ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

آسیب خزشی
معادله گستره تتا
عمر باقیمانده
پارامتر لارسن میلر
استوانه چرخان

چکیده: در این پژوهش تنش‌ها، کرنش‌ها، آسیب خزشی و عمر باقیمانده استوانه جدار ضخیم چرخان، به کمک معادله ساختاری گستره تتا و پارامتر لارسن میلر بررسی شده است. بارگذاری شامل فشار داخل و خارج، گرادیان دما و اینرسی دورانی می‌باشد. استفاده از روابط تنش-کرنش، کرنش-جابه‌جایی و تعادل منجر به دست‌یابی به معادله دیفرانسیلی مرتبه دوم و غیرهمگن شامل ترم‌های کرنش خزشی برای جابه‌جایی شعاعی می‌گردد. با صفر قرار دادن مقادیر کرنش خزشی حل ترموالاستیک مسأله در لحظه صفر حاصل می‌گردد. با در نظر گرفتن کرنش‌های خزشی در معادله مذکور و مشتق‌گیری از آن نسبت به زمان، معادله دیفرانسیلی شامل ترم‌های نرخ کرنش خزشی شعاعی و مماسی برای نرخ جابه‌جایی شعاعی به دست می‌آید. با ترکیب معادله ساختاری گستره تتا و روابط پراندتل - روس و جایگذاری به جای نرخ کرنش‌های خزشی در معادله دیفرانسیل قبلی و حل عددی آن، نرخ جابه‌جایی شعاعی و سپس تنش‌های جاری در سرتاسر استوانه محاسبه می‌شود. سپس به کمک پارامتر لارسن میلر و با استفاده از مدل طراحی رابینسون تاریخچه آسیب خزشی و عمر باقیمانده در امتداد ضخامت استوانه به دست می‌آید. نتایج حاصله نشان داد که بیشترین آسیب خزشی در سطح داخلی و کمترین آن در سطح خارجی استوانه واقع می‌گردد.

۱- مقدمه

قرار دارد. همچنین معادله ساختاری نورتون^۲ را برای حل خزشی خود در نظر گرفتند. در ادامه با در نظر گرفتن شرط کرنش صفحه‌ای اثر تغییر سرعت زاویه‌ای بر روی بازتوزیع تنش‌های شعاعی، مماسی و مؤثر را بررسی نمودند. زمانی نژاد و داوودی کشکولی [۷] تحلیل خزش وابسته به زمان را در استوانه جدار ضخیم چرخان از نوع مواد مدرج تابعی (FGM)^۳ تحت فشار داخلی و خارجی به همراه منبع تولید گرمایی بررسی کردند. آنها بازتوزیع تنش‌ها را برای زمان‌های آینده پیش‌بینی نمودند. لقمان و وهاب [۸] رفتار خزش وابسته به زمان لوله‌های بخار از جنس فولاد فریتی^۴ را تا زمان شکست پیش‌بینی نمودند. آنها از مدل ساختاری جدیدی به نام گستره تتا^۵ استفاده کرده و نشان دادند که سطح داخلی لوله بیش‌ترین و سطح خارجی آن کمترین آسیب را متحمل می‌شود. سینگ^۶ و گوپتا^۷ [۹] خزش حالت پایدار در یک استوانه از جنس کامپوزیت^۸ تحت فشار داخلی را بررسی نمودند. آنها اثرات اعمال خطی گرادیان ذرات کاربید^۹ را بر روی توزیع نرخ تنش و کرنش در استوانه بررسی

پدیده خزش تغییر شکلی وابسته به زمان است که به صورت آهسته و پیوسته در بستر زمان و تحت تأثیر بار ثابت رخ می‌دهد. در صنایع پیشرفته، سازه‌هایی وجود دارند که طی زمان‌های طولانی تحت تنش و درجه حرارت بالا قرار دارند. برای طراحی این سازه‌های پیشرفته، علاوه بر روابط عادی که در طراحی سازه‌ها کاربرد دارد، روابط خزش نیز جایگاه ویژه‌ای دارد؛ به‌عنوان مثال توربین‌های گازی و بخار در صنایع برق، پتروشیمی، هوافضا و صنایع دریایی برای فعالیت در شرایط کاری سخت و زمانی طولانی، تحت تنش‌ها و درجه حرارت بالا، طراحی می‌شوند. امروزه تحلیل خزش وابسته به زمان، بررسی آسیب‌های خزشی و عمر باقیمانده در صنایع و تجهیزاتی که با پدیده خزش سروکار دارند، از اهمیت ویژه و بالایی برخوردار گردیده است. [۱-۵] محققان بسیاری در هندسه‌ها و بارگذاری‌های مختلف تحقیقات و پژوهش‌هایی را انجام داده‌اند تا بتوانند طراحی‌ها و برنامه‌ریزی‌های به موقع برای مقابله با این پدیده مخرب را داشته باشند. حسینی و همکاران [۶] با استفاده از روابط پراندتل-روس^۱ حل دقیقی برای استوانه‌های جدار ضخیم چرخان ارائه نمودند. آنها فرض کردند که استوانه، تحت فشار داخل و خارج

- 2 Norton
- 3 Functionally Graded Material
- 4 Ferritic
- 5 Theta projection
- 6 Singh
- 7 Gupta
- 8 Composite
- 9 Carbide

1 Prandtl-Reuss

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aloghman@kashanu.ac.ir

است. طول این استوانه به اندازه کافی بلند بوده و تحت فشار داخلی P_a و فشار خارجی P_b قرار دارد. همچنین محور مورد نظر دارای چرخش با سرعت زاویه‌ای ثابت ω حول محور تقارن خود (محور z) می‌باشد. در ادامه فرض گردیده که محور جدار ضخیم در یک میدان دمایی پایدار قرار داشته که دمای سطح داخلی آن T_a و دمای سطح خارجی آن T_b می‌باشد و این میدان دمایی بدون تولید انرژی داخلی در نظر گرفته شده است. شکل ۱ شمای شماتیکی از هندسه مسأله را نشان می‌دهد.

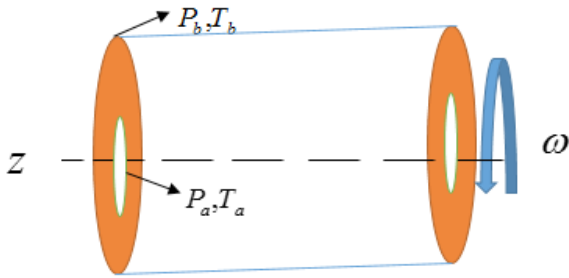


Fig. 1. Rotating thick-walled hollow cylinder subjected to mechanical and thermal loads

شکل ۱: استوانه جدار ضخیم چرخان توخالی تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی

۳- فرمول‌بندی انتقال حرارت

معادله انتقال حرارت هدایت در حالت پایدار در مختصات استوانه‌ای با رابطه (۱) بیان می‌شود. [۱۶]:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \cdot K \cdot \frac{dT(r)}{dr} \right) = 0 \quad (1)$$

$$a \leq r \leq b$$

که در آن K ضریب انتقال حرارت هدایتی در جهت شعاع و $T(r)$ توزیع انتقال حرارت در راستای ضخامت است. با دو بار انتگرال‌گیری نسبت به شعاع توزیع دما در امتداد ضخامت استوانه به صورت رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$T(r) = A_1 \ln(r) + A_2 \quad (2)$$

که در آن A_1 و A_2 ثوابت مجهول انتگرال‌گیری می‌باشند. شرایط مرزی دمایی در سطح داخلی استوانه T_a و در سطح خارجی استوانه T_b می‌باشد که این شرایط توسط رابطه (۳) به صورت زیر بیان گردیده است:

$$\begin{aligned} T(r)|_{r=a} &= T_a \\ T(r)|_{r=b} &= T_b \end{aligned} \quad (3)$$

با اعمال شرایط مرزی رابطه (۳) بر روی رابطه (۲) ضرایب مجهول A_1 و A_2 به صورت زیر به دست می‌آیند:

نمودند. لقمان و همکاران [۱۰] تحلیل خزشی وابسته به زمان یک استوانه کامپوزیتی را که تحت نیروی مغناطیسی ترموالاستیک^۱ یکنواخت و فشار داخلی قرار داشت، بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که بازتوزیع تنش شعاعی برای مقادیر مختلف خواص ماده حائز اهمیت نیست. این در حالی است که بازتوزیع اصلی در تنش‌های محوری و مؤثر اتفاق می‌افتد. دقیق و همکاران [۱۱] خزش وابسته به زمان در دیسکی چرخان از جنس فولاد فريتی را با استفاده از سری تیلور و روابط پرائندل-روس تجزیه و تحلیل نمودند. آن‌ها تاریخچه تنش، جابه‌جایی و کرنش‌های خزشی را محاسبه کرده و تأثیر سرعت زاویه‌ای بر روی تنش، کرنش خزشی و جابه‌جایی را بعد از ۲۰ سال گزارش نمودند. یو^۲ و همکاران [۱۲] خزش حالت پایدار در استوانه FGM را تحت تأثیر فشار داخل مورد بررسی قرار دادند. آنها معادله ساختاری رفتار ماده را معادله نورتون انتخاب کردند و با استفاده از معادله تعادل، حل بسته‌ای برای تنش شعاعی و سپس تنش مماسی و محوری به دست آوردند. همچنین ثابت‌های انتگرال را با استفاده از شرایط مرزی فشار در داخل و فشار صفر در سطح خارج تعیین نمودند. قربان پور آرانی و همکاران [۱۳] حل نیمه تحلیلی خزشی برای استوانه‌های پیزوالکتریک^۳ ارائه نمودند. آن‌ها اثرات میدان الکتریکی را برای گذشت ۳۰ سال از فرآیند خزش در امتداد ضخامت محور رسم کردند. یانگ^۴ [۱۴] با استفاده از روش محاسبه نرخ تنش‌ها به تحلیل خزش در استوانه جدار ضخیم پرداخت. وی کرنش کل را به صورت مجموع کرنش‌های الاستیک، حرارتی و خزشی در نظر گرفت. همچنین با به‌کارگیری معادله نورتون برای رفتار خزشی مواد، نرخ تنش‌ها و سپس توزیع تنش‌های مماسی، شعاعی و محوری را به صورت تابعی از شعاع و زمان به صورت عددی با انتخاب بازه‌های زمانی کوچک محاسبه نمود. حسینی کردخیلی و لیوانی [۱۵] تحلیل خزش ترموالاستیک یک دیسک دوار با ضخامت متغیر از جنس مواد مدرج تابعی را که تحت میدان حرارتی قرار دارد، بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که بارگذاری حرارتی تأثیر قابل توجهی بر روی نرخ کرنش خزشی دیسک دوار دارد.

در مقاله حاضر سعی گردیده با استفاده از روش محاسبه نرخ تنش و به کمک معادله ساختاری گسترده‌تر بازتوزیع تنش‌ها و کرنش‌های خزشی مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین در ادامه با استفاده از معادله ساختاری شکست لارسن میلر^۵ به بررسی آسیب خزشی و عمر باقیمانده استوانه چرخان بر اساس مدل طراحی رایینسون^۶ پرداخته شده است.

۲- هندسه و بارگذاری مسأله

یک استوانه جدار ضخیم توخالی از جنس فولاد آلیاژی بهبودیافته ۹٪ کروم - ۱٪ مولیبدنیوم به شعاع داخلی a و شعاع خارجی b در نظر گرفته شده

- 1 Magneto Thermo-Elastic
- 2 You
- 3 Piezoelectric
- 4 Yang
- 5 Larson-Miller
- 6 Rabinson

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \left[(1-\nu) \frac{u_r}{r} + \nu \frac{du_r}{dr} - (1+\nu) \alpha T(r) - \nu \varepsilon_r^c - (1-\nu) \varepsilon_{\theta}^c \right] \quad (11)$$

رابطه تعادل برای استوانه توخالی که تحت دوران با سرعت زاویه‌ای ω و چگالی جرمی ρ به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} + \rho r \omega^2 = 0 \quad (12)$$

با جایگذاری روابط (۱۰) و (۱۱) در رابطه (۱۲) معادله دیفرانسیل حاکم بر مسأله برحسب جابه‌جایی شعاعی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} r^2 \frac{d^2 u_r}{dr^2} + r \frac{du_r}{dr} - u = & \\ r \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} (\varepsilon_r^c - \varepsilon_{\theta}^c) + & \\ r^2 \left(\frac{d\varepsilon_r^c}{dr} + \frac{\nu}{1-\nu} \frac{d\varepsilon_{\theta}^c}{dr} \right) & \quad (13) \\ + \frac{r^2 \alpha (1+\nu) dT(r)}{(1-\nu) dr} - & \\ \rho r^3 \omega^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} & \end{aligned}$$

معادله (۱۳) یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم خطی ناهمگن با ضرایب متغیر از نوع کوشی-اویلر^۳ است. اگر مقادیر کرنش خزشی را در این معادله برابر صفر در نظر بگیریم حل ترموالاستیک مسأله در لحظه صفر طبق رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} u(r) = c_1 r + c_2 r^{-1} + & \\ \frac{A_1 \alpha (1+\nu) r \ln r}{(1-\nu) 2} & \quad (14) \\ \frac{1}{8} \rho r^3 \omega^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} & \end{aligned}$$

با قرار دادن رابطه (۱۴) در روابط (۱۰) و (۱۱) مقادیر تنش شعاعی و مماسی (۱۵) و (۱۶) در حالت ترموالاستیک به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$\begin{aligned} \sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (c_1 + c_2 \frac{(2\nu-1)}{r^2}) & \\ + \frac{A_1 \alpha (1+\nu)}{2(1-\nu)} (\ln r + (1-\nu)) & \quad (15) \\ + \rho r^2 \omega^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)(2\nu-3)}{8(1-\nu)} & \\ - (1+\nu) \alpha (A_1 \ln r + A_2) & \end{aligned}$$

$$A_2 = \frac{T_b \ln(a) - T_a \ln(b)}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)}, A_1 = \frac{T_a - T_b}{\ln\left(\frac{a}{b}\right)} \quad (4)$$

۴- به دست آوردن معادلات

۴-۱ فرمولاسیون و تحلیل ترموالاستیک

با توجه به در نظر گرفتن تقارن محوری در هندسه و بارگذاری تغییر مکان‌های مماسی، کرنش‌های برشی و کلیه مشتقات نسبت به θ برابر با صفر می‌باشد. بنابراین روابط کرنش - جابه‌جایی در این حالت به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u_r}{r} \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (7)$$

که در رابطه (۵)، (۶)، (۷) و (۸) ε_r ، ε_{θ} و ε_z کرنش شعاعی کل، کرنش مماسی کل و کرنش محوری کل بوده و u_r جابه‌جایی شعاعی استوانه می‌باشد. معادله تنش - کرنش برای حالت کلی که پارامترهای کرنش خزشی نیز در آن وجود داشته باشد، برای یک استوانه دوار که تحت میدان حرارتی یک بعدی شعاعی پایدار قرار داشته باشد، به صورت زیر است:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu) \varepsilon_r + \nu \varepsilon_{\theta} - (1+\nu) \alpha T(r) - (1-\nu) \varepsilon_r^c - \nu \varepsilon_{\theta}^c] \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu) \varepsilon_{\theta} + \nu \varepsilon_r - (1+\nu) \alpha T(r) - \nu \varepsilon_r^c - (1-\nu) \varepsilon_{\theta}^c] \quad (9)$$

که در روابط (۸) و (۹) E ، ν ، α ، σ_r ، σ_{θ} ، ε_r^c و ε_{θ}^c به ترتیب معرف مدول الاستیسیته^۱، ضریب پواسون^۲، ضریب انبساط حرارتی، تنش شعاعی، تنش مماسی، کرنش شعاعی خزشی و کرنش مماسی خزشی می‌باشند. با قرار دادن روابط (۵) و (۶) در روابط (۸) و (۹) روابط تنش - جابه‌جایی (۱۰) و (۱۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \sigma_r = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu) \frac{du_r}{dr} + & \\ \nu \frac{u_r}{r} - (1+\nu) \alpha T(r) - (1-\nu) \varepsilon_r^c - \nu \varepsilon_{\theta}^c] & \quad (10) \end{aligned}$$

1 Elastic modulus

2 Poisson

3 Cauchy-Euler

نرخ کرنش‌های خزشی از طریق معادلات پراندتل-روس به تنش‌ها و رفتار یک بعدی خزشی ماده طبق روابط زیر مرتبطند:

$$\dot{\epsilon}_r^c = \frac{\dot{\epsilon}_e^c}{\sigma_e} (\sigma_r - .5(\sigma_\theta + \sigma_z)) \quad (21-الف)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta^c = \frac{\dot{\epsilon}_e^c}{\sigma_e} (\sigma_\theta - .5(\sigma_r + \sigma_z)) \quad (21-ب)$$

$$\dot{\epsilon}_z^c = \frac{\dot{\epsilon}_e^c}{\sigma_e} (\sigma_z - .5(\sigma_r + \sigma_\theta)) \quad (21-ج)$$

با توجه به این‌که طول استوانه به اندازه کافی بلند می‌باشد؛ بنابراین حالت کرنش صفحه‌ای برای استوانه برقرار است:

$$\dot{\epsilon}_z^c = 0 \quad (22)$$

با استفاده از (21-ج) و (22) تنش محوری به صورت تابعی از تنش شعاعی و مماسی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\sigma_z = .5(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (23)$$

با جایگذاری رابطه (23) در روابط (21) و (22) معادلات پراندتل روس به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$\dot{\epsilon}_r^c = \frac{3}{4} \frac{\dot{\epsilon}_e^c}{\sigma_e} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (24)$$

$$\dot{\epsilon}_\theta^c = \frac{3}{4} \frac{\dot{\epsilon}_e^c}{\sigma_e} (\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (25)$$

که در رابطه (24) و (25) $\dot{\epsilon}_r^c$ ، $\dot{\epsilon}_\theta^c$ و σ_e به ترتیب معرف نرخ کرنش خزشی شعاعی، نرخ کرنش خزشی مماسی، نرخ کرنش خزشی مؤثر و تنش مؤثر می‌باشند. تنش مؤثر طبق رابطه فون مایز^۱ در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} ((\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

با توجه به رابطه (23) و با علم به اینکه برای بارگذاری این مسأله مقادیر تنش مماسی از تنش شعاعی بیشتر است رابطه (26) به صورت رابطه (27) ساده‌سازی می‌شود:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (27)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} (c_1 + c_2 \frac{(2\nu-1)}{r^2} - \frac{A_1 \alpha (1+\nu)}{2(1-\nu)} (\ln r + \nu) - \rho r^2 \omega^2 \frac{(1+\nu)(1-4\nu^2)}{8(1-\nu)} - (1+\nu)\alpha(A_1 \ln r + A_2)) \quad (16)$$

۴-۲- شرایط مرزی مسأله

از آنجا که استوانه تحت فشار هیدرواستاتیک داخل و خارج قرار دارد؛ بنابراین شرایط مرزی مناسب برای آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= p_a & r &= a \\ \sigma_r &= p_b & r &= b \end{aligned} \quad (17)$$

با اعمال شرایط مرزی (17) بر روی رابطه (15) ثوابت مجهول c_1 و c_2 به صورت روابط (18) و (19) به دست خواهند آمد:

$$c_1 = \frac{p_a(1+\nu)(1-2\nu)}{E} - \left(\frac{c_2(2\nu-1)}{a^2} + \frac{A_1 \alpha (1+\nu)}{2(1-\nu)} (\ln a + (1-\nu)) + \rho a^2 \omega^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)(2\nu-3)}{8(1-\nu)} - (1+\nu)\alpha(A_1 \ln a + A_2) \right) \quad (18)$$

$$c_2 = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{(p_b - p_a)(1+\nu)}{E} + \frac{A_1 \alpha (1+\nu) \ln \left(\frac{a}{b} \right)}{(2\nu-1) \left(1 - \frac{1}{2(1-\nu)} \right)} + \rho \omega^2 \frac{(1+\nu)(2\nu-3)}{8E(1-\nu)} (a^2 - b^2) \right) \quad (19)$$

۴-۳- تحلیل خزش وابسته به زمان

با در نظر گرفتن معادله دیفرانسیل (13) و با مشتق‌گیری زمانی از آن و با توجه به این نکته که میدان حرارتی پایدار است، سرعت زاویه‌ای استوانه نیز ثابت می‌باشد، معادله دیفرانسیل (20) شامل نرخ کرنش‌های خزشی برای نرخ جابه‌جایی شعاعی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} r^2 \frac{d^2 \dot{u}_r}{dr^2} + r \frac{d \dot{u}_r}{dr} - \dot{u}_r &= \\ r \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} (\dot{\epsilon}_r^c - \dot{\epsilon}_\theta^c) &+ \\ r^2 \left(\frac{d \dot{\epsilon}_r^c}{dr} + \frac{\nu}{1-\nu} \frac{d \dot{\epsilon}_\theta^c}{dr} \right) & \end{aligned} \quad (20)$$

$$\dot{\varepsilon}_r^c = -\frac{\sqrt{3}}{2}(\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}) \quad (33)$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta^c = \frac{\sqrt{3}}{2}(\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}) \quad (34)$$

با جایگذاری روابط (۳۳) و (۳۴) در رابطه (۲۰) معادله دیفرانسیل مرتبه دوم غیر همگن برای نرخ جابه‌جایی شعاعی در حالت خزشی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\dot{u}_r}{dr^2} + \frac{d\dot{u}_r}{dr} - \frac{\dot{u}_r}{r^2} = \\ -\frac{\sqrt{3}(1-2\nu)}{r(1-\nu)}(\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2(1-\nu)}\frac{d}{dr}(\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}) \end{aligned} \quad (35)$$

با حل معادله (۳۵) نرخ جابه‌جایی شعاعی به دست می‌آید:

$$\dot{u}(r) = c_3r + c_4r^{-1} + \frac{g(r)}{r} \quad (36)$$

$$g(r) = -\int h(r)r dr \quad (37)$$

$$\begin{aligned} h(r) = \int \left(\frac{\sqrt{3}}{2(1-\nu)}\frac{d}{dr}(\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}) + \right. \\ \left. \frac{\sqrt{3}(1-2\nu)}{r(1-\nu)}(\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}) \right) \end{aligned} \quad (38)$$

ثابت‌های c_3 و c_4 که ثوابت مجهول هستند باید در هر مرحله از فرآیند حل مسأله، پس از محاسبه عددی انتگرال‌های (۳۷) و (۳۸) و جایگذاری آن‌ها در رابطه (۳۶) با استفاده از شرایط مرزی مسأله به دست آیند. با مشتق‌گیری زمانی از روابط (۱۰) و (۱۱) برای نرخ تنش‌ها بر حسب نرخ جابه‌جایی به دست می‌آید:

$$\dot{\sigma}_r = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \left[(1-\nu)\frac{d\dot{u}_r}{dr} + \nu\frac{\dot{u}_r}{r} - (1-\nu)\dot{\varepsilon}_r^c - \nu\dot{\varepsilon}_\theta^c \right] \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_\theta = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \\ \left[(1-\nu)\frac{\dot{u}_r}{r} + \nu\frac{d\dot{u}_r}{dr} - \nu\dot{\varepsilon}_r^c - (1-\nu)\dot{\varepsilon}_\theta^c \right] \end{aligned} \quad (40)$$

معادله ساختاری ارائه شده برای توصیف رفتار کرنش - زمان ماده تا زمان t با استفاده از روش گستره تتا به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\varepsilon_e = \theta_1(1 - e^{-\theta_2t}) + \theta_3(e^{\theta_4t} - 1) \quad (28)$$

که در آن ε_e کرنش مؤثر بعد از گذشت زمان مورد نظر می‌باشد. با مشتق‌گیری از رابطه (۲۸) بر حسب زمان نرخ کرنش مؤثر در هر زمان به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$\dot{\varepsilon}_e = \theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t} \quad (29)$$

که پارامترهای $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ در رابطه (۲۹) وابسته به دما و تنش بوده که طبق رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \log_{10} \theta_i = a_i + b_i T + \\ c_i \sigma_e + d_i \sigma_e T \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (30)$$

که در رابطه (۳۰) T و σ_e تنش مؤثر و دما هستند. واحد زمان، دما و تنش در معادلات فوق به ترتیب ساعت، کلونین و مگاپاسکال می‌باشد. پارامترهای a_i, b_i, c_i, d_i ثوابت ماده هستند که برای فولاد آلیاژی به‌بود یافته ۹٪ کروم-۱٪ مولیبدینوم در جدول ۱ ارائه شده‌اند [۱۷].

جدول ۱: مقادیر ضرایب ثابت a_i, b_i, c_i, d_i مربوط به معادله ساختاری ماده [۱۷]

Table 1. Material constants for niobium-modified 9Cr-1Mo steel				
پارامتر	a	b	c	d
$\log \theta_1$	-۱۳/۳۵	۰/۰۰۸۶	-۰/۰۶۰	۰/۰۰۰۰۹۵۶
$\log \theta_2$	-۹۰/۳۴	۰/۰۹۶۸	۱/۰۱۴	-۰/۰۰۱۰۸۵۹
$\log \theta_3$	-۴۹/۰۸	۰/۰۵۱۳	۰/۷۳۵	-۰/۰۰۰۰۸۰
$\log \theta_4$	-۳۰/۶۹	۰/۰۲۶۳	-۰/۱۱۸	۰/۰۰۰۱۶۶۸

با قرار دادن رابطه (۲۹) در روابط (۲۴) و (۲۵) روابط جدیدی برای نرخ کرنش خزشی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\dot{\varepsilon}_r^c = \frac{3}{4} \frac{\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}}{\sigma_e} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (31)$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta^c = \frac{3}{4} \frac{\theta_1\theta_2e^{-\theta_2t} + \theta_3\theta_4e^{\theta_4t}}{\sigma_e} (\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (32)$$

با قرار دادن رابطه (۲۷) در روابط (۳۱) و (۳۲) و سپس ساده‌سازی آنها، نرخ کرنش خزشی شعاعی و مماسی بر حسب پارامترهای تتا به صورت زیر به دست می‌آیند:

خزشی در هر نقطه میزان آسیب خزشی تا رسیدن به زمان شکست در آن نقطه را تعیین خواهد نمود؛ بنابراین طبق قانون رایبسون برای آسیب خزشی طبق رابطه (۴۶) داریم:

$$D = \sum_{k=1}^K \frac{\Delta t_k}{t_{r_k}} \quad (46)$$

همچنین با داشتن آسیب خزشی و زمان شکست در هر نقطه از استوانه، عمر باقیمانده طبق قانون رایبسون به صورت رابطه (۴۷) تعریف می‌گردد:

$$R = (1-D)t_r \quad (47)$$

برای یافتن زمان شکست در هر نقطه از معادله ساختاری شکست لارسن میلر که برای ماده مورد نظر توسط آزمایشات پیشین انجام گرفته، استفاده خواهد شد. ابتدا با داشتن تنش مؤثر در هر نقطه از استوانه مقدار پارامتر لارسن میلر در تمام نقاط توسط رابطه (۴۸) محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$LMP = A_1 \log^3(\sigma_{eff}) + A_2 \log^2(\sigma_{eff}) + A_3 \log(\sigma_{eff}) + A_4 \quad (48)$$

که در آن $A_4 = 91837$ و $A_3 = -94041$ ، $A_2 = 47438$ ، $A_1 = -8404/2$ می‌باشد و در ادامه طبق رابطه زیر مقدار زمان شکست در هر نقطه با داشتن توزیع دما در آن نقطه محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$LMP = (C + \log_{10}(t_r))T \quad (49)$$

که در رابطه (۴۹) زمان شکست در هر نقطه بر حسب ساعت و T دما بر حسب کلونین می‌باشد. همچنین برای ماده مورد نظر $C = 26/2$ در نظر گرفته شده است.

۶- مراحل روش عددی مورد استفاده

۱- به منظور این که تمام نقاط موجود در ضخامت استوانه برای تمام زمان‌های مورد نظر مورد محاسبه قرار گیرد، ضخامت استوانه به تعداد جزء یکسان تقسیم‌بندی شده و با اندیس نمایش داده می‌شود. شکل ۲ تقسیم‌بندی ضخامت استوانه را نمایش می‌دهد [۱۱].

۲- سپس در لحظه $(t=0)$ به حل ترموالاستیک مسأله پرداخته می‌شود و مقادیر تنش شعاعی، تنش مماسی و در ادامه تنش مؤثر با استفاده از رابطه فن مایز به دست می‌آید.

۳- در ادامه یک بازه زمانی مناسب انتخاب می‌شود و زمان کل، مجموع جزءهای زمانی خواهد بود که فرآیند خزش در آن صورت می‌گیرد. به بیان دیگر زمان برای مرحله نام به صورت رابطه (۵۰) تعریف می‌شود.

$$t_i = \sum_{k=0}^i \Delta t_k \quad (50)$$

با جایگذاری رابطه (۳۶) در روابط (۳۹) و (۴۰) و سپس ساده‌سازی نرخ تنش شعاعی و مماسی طبق رابطه (۴۱) و (۴۲) به دست می‌آید:

$$\dot{\sigma}_r = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \left[c_3 + \frac{(2\nu-1)}{r^2} c_4 + \frac{(1-\nu)}{r} \frac{dg(r)}{dr} + \frac{(2\nu-1)g(r)}{r^2} - (1-\nu)\dot{\epsilon}_r^c - \nu\dot{\epsilon}_\theta^c \right] \quad (41)$$

$$\dot{\sigma}_\theta = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \left[c_3 + \frac{(1-2\nu)}{r^2} c_4 + \frac{\nu}{r} \frac{dg(r)}{dr} + \frac{(1-2\nu)g(r)}{r^2} - \nu\dot{\epsilon}_r^c - (1-\nu)\dot{\epsilon}_\theta^c \right] \quad (42)$$

با توجه به اینکه تنش در شعاع داخل و خارج ثابت است، نرخ تغییرات تنش در هر دو شعاع داخل و خارج استوانه صفر می‌شود:

$$\dot{\sigma}_r|_{r=a} = 0 \quad (43)$$

$$\dot{\sigma}_r|_{r=b} = 0$$

بنابراین با استفاده از رابطه (۴۳) مقادیر ثابت‌های انتگرال‌گیری c_3 و c_4 توسط روابط (۴۴) و (۴۵) محاسبه می‌شوند:

$$c_3 = -\left(c_4 \frac{(2\nu-1)}{a^2} + \frac{(1-\nu)}{a} \left(\frac{dg}{dr} \right)_{r=a} + \frac{(2\nu-1)}{a^2} g(a) - (1-\nu)\dot{\epsilon}_r^c(a) - \nu\dot{\epsilon}_\theta^c(a) \right) \quad (44)$$

$$c_4 = \frac{a^2 b^2}{(2\nu-1)(b^2 - a^2)} \left((1-\nu) \left(\frac{1}{b} \left(\frac{dg}{dr} \right)_{r=b} - \frac{1}{a} \left(\frac{dg}{dr} \right)_{r=a} \right) + \left(\frac{g(a)}{a^2} - \frac{g(b)}{b^2} \right) + (1-\nu)(\dot{\epsilon}_r^c(a) - \dot{\epsilon}_r^c(b)) + \nu(\dot{\epsilon}_\theta^c(a) - \dot{\epsilon}_\theta^c(b)) \right) \quad (45)$$

۵- آسیب خزشی و عمر باقیمانده با استفاده از پارامتر لارسن میلر

اگر در بازه زمانی Δt_k در یک نقطه از استوانه تنش مؤثر برابر σ_{ek} و دما در آن نقطه T_k باشد و در این دما و این تنش مؤثر زمان شکست ماده t_{rk} را داشته باشیم، آنگاه آسیب جزئی وارد شده به آن نقطه از استوانه در این بازه زمانی برابر با $\Delta t_k / t_{rk}$ می‌باشد [۸]. اگر برای سایر بازه‌های زمانی با توجه به تغییر تنش مؤثر در هر نقطه زمان شکست تعیین گردد، جمع جزءهای آسیب

شکل ۳ نمودار فلوجارت روش عددی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

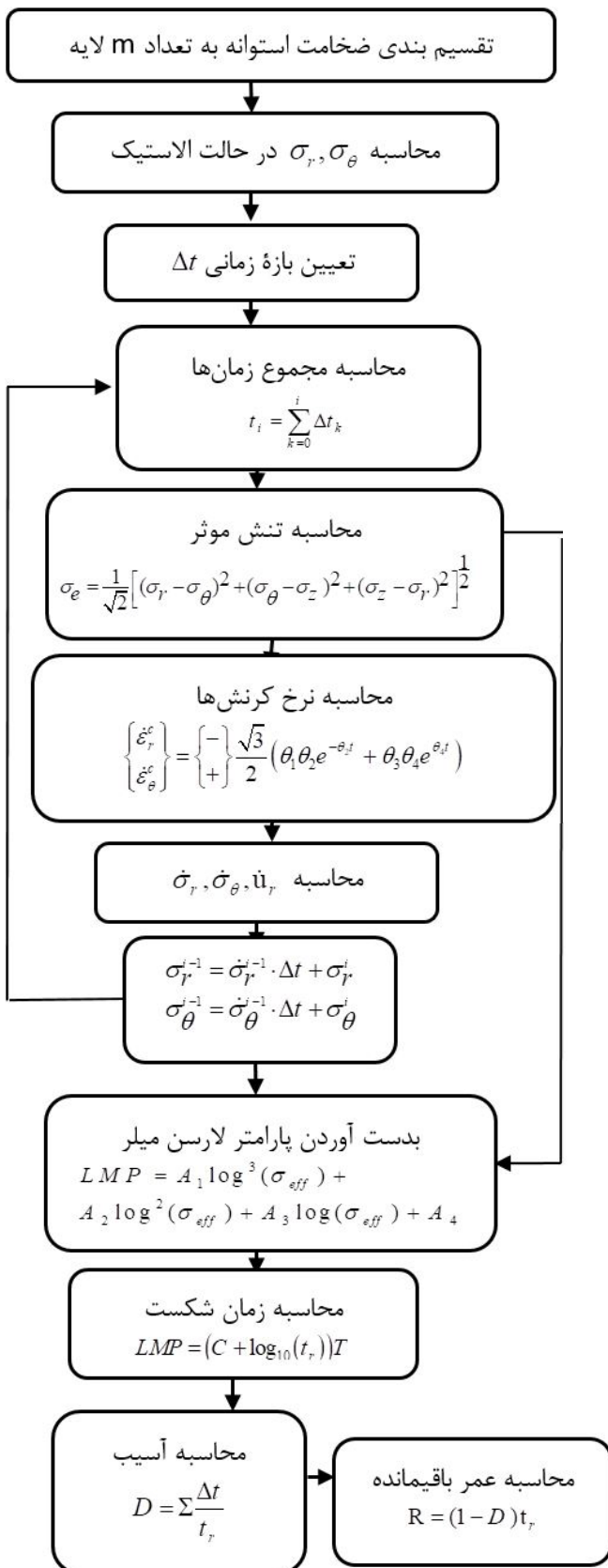


Fig. 3. Numerical flowchart

شکل ۳: نمودار فلوجارت عددی مورد استفاده

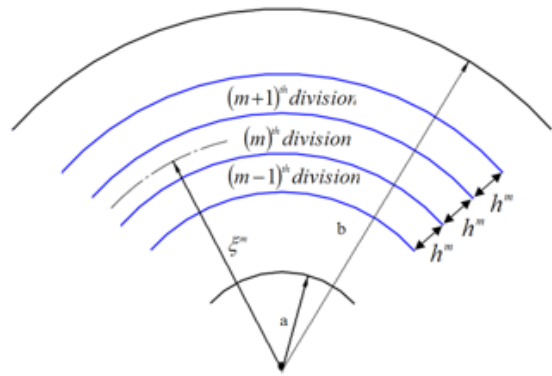


Fig. 2. Dividing radial domain

شکل ۲: تقسیم بندی ضخامت استوانه

۴- به کمک روابط (۵۱) و (۵۲) نرخ کرنش خزشی شعاعی و مماسی در هر قسمت تعیین شده و سپس به کمک معادله (۳۵) نرخ جابه‌جایی شعاعی محاسبه می‌شود.

$$\dot{\epsilon}_{r_{ij}}^c = -\frac{\sqrt{3}}{2} (\theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t_{ij}} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 t_{ij}}) \quad (51)$$

$$\dot{\epsilon}_{\theta_{ij}}^c = \frac{\sqrt{3}}{2} (\theta_1 \theta_2 e^{-\theta_2 t_{ij}} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 t_{ij}}) \quad (52)$$

۵- در ادامه با توجه به روابط (۳۹) و (۴۰) مقادیر نرخ تنش در هر مرحله محاسبه می‌گردد.

۶- مقادیر جدید تنش‌های جاری با داشتن تنش شعاعی و مماسی مرحله قبل و حالت ترموالاستیک ($t=0$) طبق رابطه (۵۳) به دست می‌آید [۷].

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r, t_i) &= \sigma_r^{(i-1)}(r, t_{i-1}) + \dot{\sigma}_r^{(i)}(r, t_i) \Delta t^{(i)} \\ \sigma_{\theta\theta}^{(i)}(r, t_i) &= \sigma_{\theta\theta}^{(i-1)}(r, t_{i-1}) + \dot{\sigma}_{\theta\theta}^{(i)}(r, t_i) \Delta t^{(i)} \end{aligned} \quad (53)$$

۷- با داشتن مقادیر تنش موثر در هر مرحله و توزیع دما در راستای ضخامت استوانه مقدار پارامتر لارسن میلر طبق رابطه (۴۸) در هر مرحله محاسبه و سپس طبق رابطه (۴۹) زمان شکست در هر نقطه تعیین می‌گردد.

۸- در ادامه آسیب در تمام قسمت‌ها در هر مرحله از حل در راستای ضخامت استوانه با استفاده از مدل رایبسون به صورت رابطه (۵۴) به دست می‌آید:

$$D_{ij} = \sum \frac{\Delta t_i}{t_{r_{ij}}} \quad (54)$$

۹- با داشتن مقادیر آسیب در هر نقطه و در هر مرحله از حل مقادیر عمر باقیمانده نیز به صورت رابطه (۵۵) حاصل می‌گردد:

$$R_{ij} = (1 - D_{ij}) t_{r_{ij}} \quad (55)$$

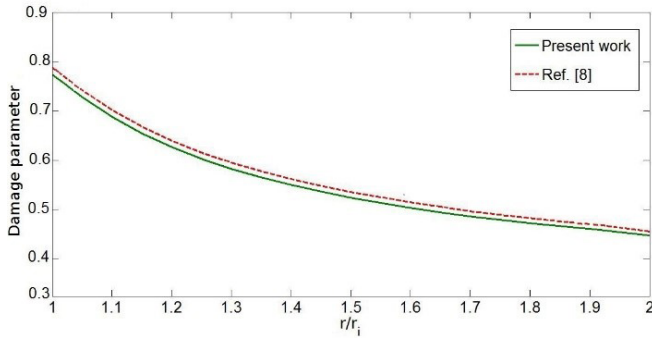


Fig. 5. Comparison of damage parameter histories after 16 years
شکل ۵: مقایسه آسیب خزشی پس گذشت ۱۶ سال از فرآیند خزش

$$\frac{b}{a} = 2 \quad \omega = 3400 \text{ rad/s}$$

$$p(r=a) = -50 \text{ MPa} \quad p(r=b) = -40 \text{ MPa}$$

$$T(r=b) = 848 \text{ K} \quad T(r=a) = 858 \text{ K}$$

شکل ۶ نمودار تنش شعاعی بی‌بعد شده برای ساعت‌های طولانی سپری شده پس از شروع فرآیند خزش را نشان می‌دهد. بیشترین تغییرات تنش شعاعی برای سال‌های اولیه می‌باشد و در سال‌های بعدی منحنی‌ها به سمت همگرا شدن به پیش می‌روند. این رفتار منحنی‌ها به خاطر تغییرات زیاد شیب در ناحیه اول منحنی خزش می‌باشد. منحنی‌ها در سطوح نیز شرایط مرزی مسأله را ارضا نموده است.

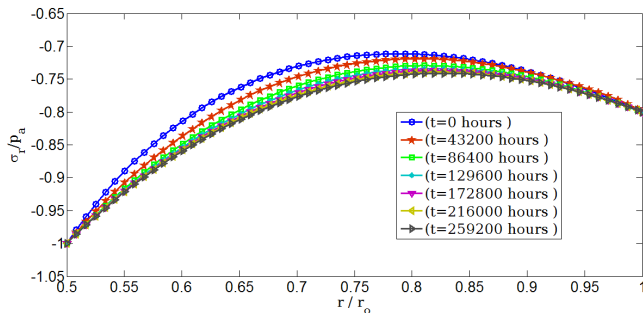


Fig. 6. Dimensionless radial stress redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours

شکل ۶: باز توزیع تنش شعاعی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

در شکل ۷ تغییرات تنش مماسی برای گذشت ۲۵۹۲۰۰ ساعت از شروع فرآیند خزش رسم شده است. به طور کلی تنش‌های مماسی در طی زمان در سطح داخلی روند نزولی داشته و در سطح خارجی افزایش می‌یابند. همچنین پس از گذشت سال‌های فراوان از فرآیند خزش، منحنی‌ها به سمت همگرایی می‌روند. در شکل ۸ بازتوزیع تنش مماسی مؤثر برای گذشت ساعت‌های طولانی از فرآیند خزش ترسیم گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تنش مؤثر شباهت زیادی به نمودار تنش مماسی دارد که علت آن این است که مقادیر تنش مماسی مقادیر بزرگتری نسبت به تنش شعاعی دارند؛ لذا مقادیر تنش مؤثر نزدیکی بسیاری با مقادیر تنش مماسی خواهد داشت.

شکل ۴ منحنی کرنش خزشی بر حسب زمان را برای داده‌های جدول ۱ در یک دمای معین و تنش‌های متفاوت به نمایش می‌گذارد.

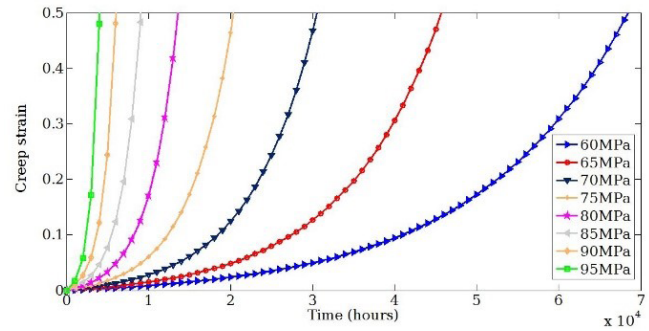


Fig. 4. Creep curves based on material constants of table 1 for temperature of 650 and different stresses.

شکل ۴: منحنی خزش براساس داده‌های جدول ۱ برای دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و تنش‌های مختلف

۷- نتایج عددی و بحث

برای بررسی صحت نتایج کار حاضر، نتایج حاصل از آن با پژوهش انجام شده توسط لقمان و وهاب [۸] مقایسه می‌گردد. برای دستیابی بدین مهم چرخش استوانه در کار حاضر حذف گردیده ($\omega=0$) و در ادامه از کلیه داده‌های عددی مرجع [۸] استفاده می‌گردد. با محاسبه کرنش شکست توسط رابطه (۵۷)، زمان شکست توسط رابطه (۵۸) به دست می‌آید. با داشتن زمان شکست، آسیب خزشی طبق رابطه (۴۶) برای ۱۶ سال پس از گذشت پدیده خزش حاصل می‌گردد. منحنی شکل ۵ این آسیب خزشی را در امتداد ضخامت استوانه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این نتیجه با نتایج مرجع [۸] قرابت خوبی دارد و در نسبت شعاع‌های متفاوت دارای رفتار تقریباً مشابهی می‌باشد. البته مقادیر آسیب در دو منحنی دارای اختلاف اندکی هستند که علت این اختلاف ناچیز استفاده از روش‌های عددی متفاوت برای حل مسأله می‌باشد.

$$\varepsilon_f = a_5 + b_5 T + c_5 \sigma_e + d_5 \sigma_e T \quad (56)$$

$$\varepsilon_f = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t_r}) + \theta_3(e^{\theta_4 t_r} - 1) \quad (57)$$

در ادامه کلیه نتایج این پژوهش با استفاده از مقادیر خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد آلیاژی بهبودیافته ۹٪ کروم - ۱٪ مولیبدنیوم ارائه می‌گردند [۲۱، ۲۰]:

$$E = 160 \text{ GPa} \quad \alpha = 14.1e - 6 \left(\frac{1}{\text{K}}\right)$$

$$\nu = 0.3 \quad \rho = 7860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

همچنین مقادیر نسبت شعاع، فشار و دمای داخل و خارج و سرعت زاویه‌ای محور به صورت زیر فرض می‌گردد:

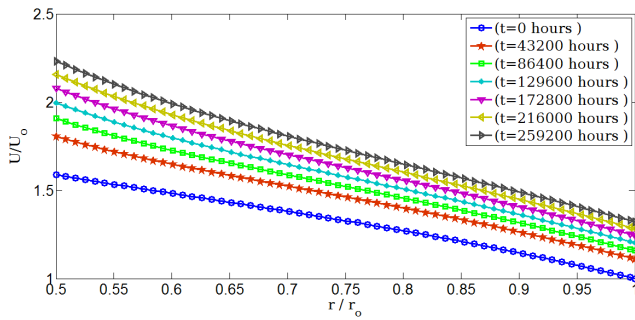


Fig. 9. Dimensionless radial displacement redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۹: باز توزیع جابه‌جایی شعاعی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

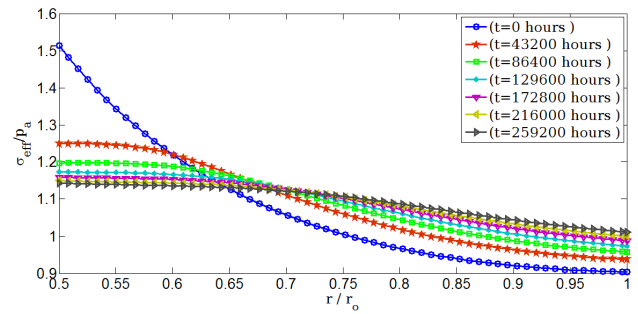


Fig. 7. Dimensionless circumferential stress redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۷: باز توزیع تنش مماسی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

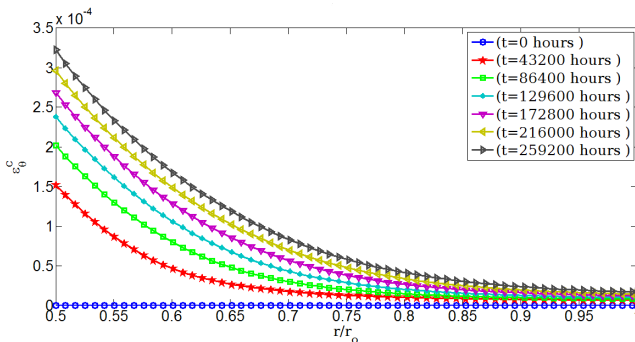


Fig. 10. Circumferential strain redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۱۰: باز توزیع کرنش مماسی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

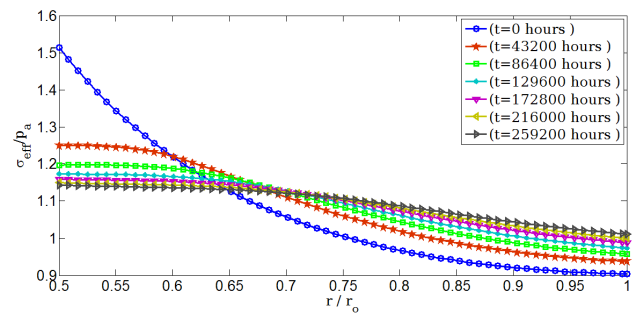


Fig. 8. Dimensionless effective stress redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۸: باز توزیع تنش مؤثر در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

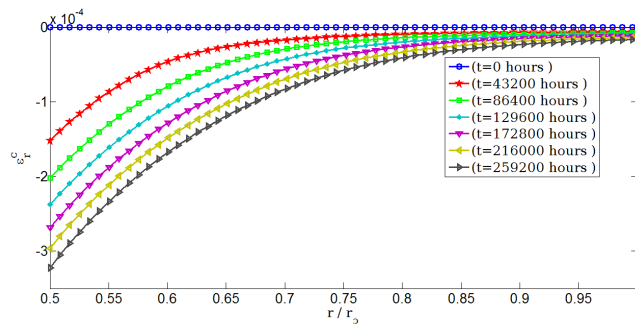


Fig. 11. Radial strain redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۱۱: باز توزیع کرنش شعاعی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با گذشت زمان آسیب خزشی در سرتاسر استوانه افزایش می‌یابد. بیشترین آسیب خزشی نیز در جداره داخلی محور اتفاق می‌افتد. علت این رویداد این است که بیشترین تنش مؤثر در جداره داخلی استوانه اتفاق می‌افتد. همچنین این سطح در معرض بیشینه دما قرار دارد. جدول ۲ نیز مقادیر پارامتر آسیب خزشی در نقاط مختلف محور را با گذشت زمان نشان می‌دهد که نتایج حاصل از منحنی شکل ۱۴ را تأیید می‌کند.

شکل ۹ نمودار جابه‌جایی شعاعی را در امتداد ضخامت استوانه برای گذشت زمان ۲۵۹۲۰۰ ساعت از شروع فرآیند خزش به نمایش می‌گذارد. با گذشت زمان جابه‌جایی شعاعی در استوانه افزایش می‌یابد. جابه‌جایی شعاعی در استوانه از جداره داخلی تا جداره خارجی سیر نزولی داشته و بیشترین جابه‌جایی مربوط به سطح داخلی و کمترین آن مربوط به سطح خارجی استوانه می‌باشد. منحنی‌های شکل‌های ۱۰ و ۱۱ باز توزیع کرنش‌های خزشی مماسی و شعاعی برای استوانه دوار توخالی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که منحنی‌های کرنش خزشی شعاعی و مماسی قرینه یکدیگر هستند. این واقعیت باتوجه به غیرقابل تراکم در نظر گرفتن پدیده خزش (مجموع کرنش‌های خزشی برابر صفر) و همچنین کرنش مسطح بودن مسأله قابل استنباط می‌باشد. هرچه زمان می‌گذرد مقادیر قدرمطلق کرنش‌های خزشی افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین میزان کرنش‌های خزشی در جداره داخلی و کمترین آن در جداره خارجی واقع می‌گردد.

همچنین نمودارهای نرخ کرنش‌های خزشی توسط منحنی‌های شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. این دو منحنی نیز قرینه یکدیگر بوده که معادلات قبلی به دست آمده را تأیید می‌کند. نرخ کرنش‌های خزشی در جداره داخلی با افزایش زمان کاهش و در جداره خارجی افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ تاریخچه آسیب خزشی در امتداد ضخامت استوانه چرخان را برای گذشت زمان‌های طولانی از شروع پدیده خزش نشان می‌دهد.

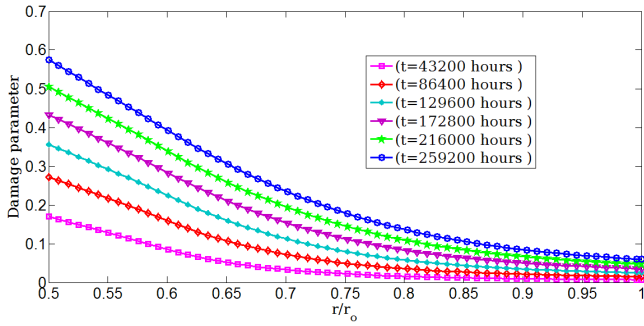


Fig. 14. Changes in creep damage along with the thickness of cylinder after 259200 hours from the beginning of creep process.

شکل ۱۴: تغییرات آسیب خزشی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

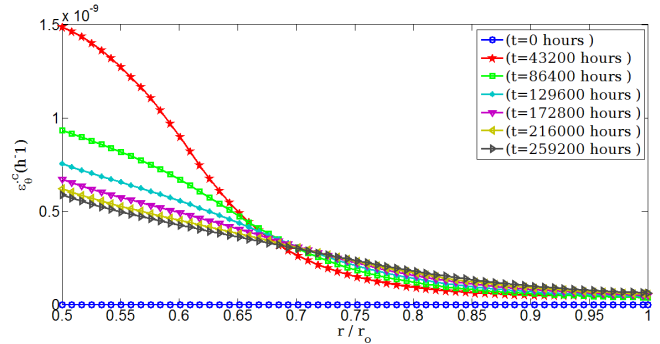


Fig. 12. Circumferential strain rate redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۱۲: باز توزیع نرخ کرنش خزشی مماسی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

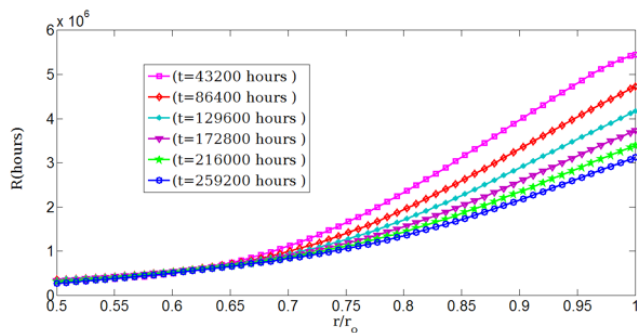


Fig. 15. Remnant life histories of rotating hollow shaft from initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۱۵: باز توزیع عمر باقیمانده در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

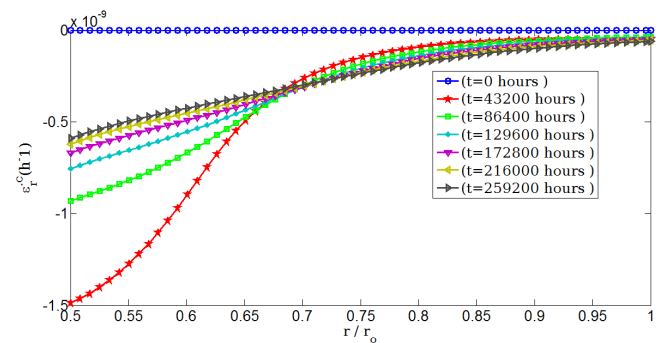


Fig. 13. Radial strain rate redistribution of rotating hollow shaft from its initial elastic up to 259200 hours.

شکل ۱۳: باز توزیع نرخ کرنش خزشی شعاعی در امتداد ضخامت استوانه پس از گذشت (۲۵۹۲۰۰ ساعت) از شروع فرآیند خزش

۸- نتیجه گیری

در این کار باز توزیع تنش‌ها، کرنش‌ها و همچنین آسیب‌های خزشی و عمر باقیمانده برای مدت حدود ۳۰ سال پس از فرآیند خزش به کمک معادله ساختاری گستره تتا و پارامتر شکست لارسن میلر بررسی گردید. نتایج حاصله نشان داد که بیشترین تنش مؤثر و همچنین آسیب خزشی در جداره داخلی و کمترین آنها در جداره خارجی اتفاق می‌افتد. این در حالی است که

در ادامه نیز شکل ۱۵ باز توزیع عمر باقیمانده خزشی را برای گذشت ۲۵۹۲۰۰ ساعت از شروع فرآیند خزش به نمایش می‌گذارد. با گذشت زمان، عمر باقیمانده نیز کاهش می‌یابد. بیشترین عمر باقیمانده متعلق به جداره خارجی و کمترین آن به جداره داخلی تعلق دارد.

جدول ۲: مقادیر آسیب خزشی برای ساعت‌های متفاوت سپری شده از فرآیند خزش برای نسبت شعاع‌های مختلف

Table 2. Creep Damage values for different hours elapsed from the creep process for different radii ratios

ساعت ۲۵۹۲۰۰ بعد از شروع فرآیند خزش	ساعت ۲۱۶۰۰۰ بعد از شروع فرآیند خزش	ساعت ۱۷۲۸۰۰ بعد از شروع فرآیند خزش	ساعت ۱۲۹۶۰۰ بعد از شروع فرآیند خزش	ساعت ۸۶۴۰۰ بعد از شروع فرآیند خزش	ساعت ۴۳۲۰۰ بعد از شروع فرآیند خزش	r/r_0
۰/۵۸۱۰	۰/۵۱۰۳	۰/۴۳۶۶	۰/۳۵۸۵	۰/۲۷۲۷	۰/۱۷۰۰	۰/۵
۰/۴۰۳۸	۰/۳۴۹۲	۰/۲۹۲۰	۰/۲۳۱۲	۰/۱۶۴۷	۰/۰۸۸۱	۰/۶
۰/۲۴۲۲	۰/۲۰۱۰	۰/۱۵۹۱	۰/۱۱۶۷	۰/۰۷۴۵	۰/۰۳۳۷	۰/۷
۰/۱۴۰۲	۰/۱۱۲۲	۰/۰۸۵۲	۰/۰۵۹۸	۰/۰۳۶۴	۰/۰۱۵۹	۰/۸
۰/۰۸۶۴	۰/۰۶۸۱	۰/۰۵۱۱	۰/۰۳۵۵	۰/۰۲۱۶	۰/۰۰۹۵	۰/۹
۰/۰۶۱۰	۰/۰۴۸۲	۰/۰۳۶۳	۰/۰۲۵۵	۰/۰۱۵۷	۰/۰۰۷۲	۱/۰۰

Vajedi, Magneto-thermoelastic creep analysis of functionally graded cylinders, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87(7) (2010) 389-395.

- [11] V. Daghigh, H. Daghigh, A. Loghman, A. Simoneau, Time-dependent creep analysis of rotating ferritic steel disk using Taylor series and Prandtl-Reuss relation, *International Journal of Mechanical sciences*, 77(2013) 40-46.
- [12] L.H. You, H. Ou, Z.Y. Zheng, Creep deformations and stresses in thick-walled cylindrical vessels of functionally graded materials subjected to internal pressure, *Composite Structures*, 78(2) (2007) 285-291.
- [13] A. Ghorbanpour Arani, A.A. Mosallaie Barzoki, R. Kolahchi, M.R. Mozdianfard, A. Loghman, Semi-analytical solution of time-dependent electro-thermomechanical creep for radially polarized piezoelectric cylinder, *Computers and Structures*, 89(2010) 1494-1502.
- [14] Y.Y. Yang, Time-dependent stress analysis in functionally graded materials, *International Journal of Solids and Structures*, 37 (2000) 7593-7608.
- [15] S.A. Hosseini Kordkheili, M. Livani, Thermoelastic creep analysis of a functionally graded various thickness rotating disk with temperature-dependent material properties, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 111(2013) 63-74.
- [16] M. Davoudi Kashkoli, M. Zamani Nejad, Effect of heat flux on creep stresses of thick-walled cylindrical pressure vessels, *Journal of Applied Research and Technology*, 12(3) (2014). 585-597.
- [17] G. Lewis, K. Shaw, Creep constitutive model and component lifetime estimation: the Case of niobium-modified 9Cr-1Mo steel weldments, *Journal of Materials Engineering and performance*, 20(7) (2011) 1310-1314.
- [18] Loghman A, Shokouhi N. Creep damage evaluation of thick-walled spheres using a long-term creep constitutive model, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(10) (2009) 2577-82.
- [19] T. Masse, Y. Lejeail, Creep mechanical behaviour عمر باقیمانده دقیقاً عکس این مهم را نشان می‌دهد. با گذشت زمان تنش مؤثر در سطح داخلی کمتر شده و در سطح خارجی به مقدار اندکی افزایش پیدا می‌کند اما همچنان جداره داخلی در معرض بیشترین آسیب خزشی می‌باشد.
- منابع**
- [1] H. Kraus, *Creep Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- [2] S.L. Mannan, S.C. Chetal, B. Raj, S.B. Bhoje, Selection of Materials for Prototype Fast Breeder Reactor, *Transactions Indian Institute of Metals*, 56(2) (2003) 155-178.
- [3] G.V. Smith, *Properties of Metals at Elevated Temperatures*, McGraw-Hills, New York, 1950.
- [4] A.K. Koul, R. Castillo, K. Willett, Creep life predictions in Nickel-based superalloys, *Materials Science and Engineering*, 66(2) (1984) 213-226.
- [5] A. Loghman, A. Askari Kashan, M. Younesi Bidgoli, A.R. Shajari, A. Ghorbanpour Arani, Effect of particle content, size and temperature on magneto-thermo-mechanical creep behavior of composite cylinders, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(4) (2013) 1041-1051.
- [6] Z. Hoseini, M.Z. Nejad, A. Niknejad, M. Ghannad, New exact solution for creep behavior of rotating thick-walled cylinders, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 1(10) (2011) 1704-1708.
- [7] M. Zamani Nejad, M. Davoudi Kashkoli, Time-dependent thermo-creep analysis of rotating FGM thick-walled cylindrical pressure vessels under heat flux, *International Journal of Engineering science*, 82 (2014) 222-237.
- [8] A. Loghman, M.A. Wahab, Creep damage simulation of thick-walled tubes using the Θ projection concept, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 67(1) (1996) 105-111.
- [9] T. Singh, V.K. Gupta, Modeling steady state creep in functionally graded thick cylinder subjected to internal pressure, *Journal of Composite Materials*, 44(11) (2010) 1317-1333.
- [10] A. Loghman, A. Ghorbanpour Arani, S. Amir, V.

- Materials Science & Engineering A*, 615(2014) 348-360.
- [21] L. Xiaotian, M.T. Cabrillat, Y. Lejeail, Study of modified 9Cr-1Mo steel weldments, *International Atomic Energy Agency*, 43(2006) 64-92.
- of modified 9Cr1Mo steel weldments: Experimental analysis and modelling, *Journal of Nuclear Engineering and Design*, 254 (2013) 97-110.
- [20] S. Goyal, K. Laha, Creep life prediction of 9Cr-1Mo steel under multiaxial state of stress, *Journal of*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H. Mohammadi Hooyeh, M. Safari, A. Loghman, Time-dependent Analysis and Creep Life Prediction for Rotating Hollow Cylinders Made of Alloy Steel Using Theta Projection Concept and the Larson Miller Parameter, *Amirkabir J.*

Mech. Eng., 49(4) (2018) 673-684.

DOI: 10.22060/mej.2016.747

