

Evaluation of the Creep Behavior of HP35Nb Heat Resistant Steel Using Finite Element Method

Yasamin Mohammadi¹ and Aboozar Taherizadeh^{1*}

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

Abstract: Prediction of creep behavior in heat-resistant alloys, especially under elevated stress and temperature conditions, is crucial for the design and optimization of industrial components. Significant risks and costs often arise from sudden damage and failure due to creep. Experimental tests for evaluation of creep behavior are time-consuming and expensive; thus, developing accurate numerical models for creep prediction is essential. The power law model and theta projection model are known as two widely-used methods. This study investigated the creep behavior of HP35Nb alloy under varying stress conditions and elevated temperatures through simulations using both power law and theta projection models. A comparison of the numerical results with experimental data was conducted to assess the accuracy of each model in predicting creep behavior. The findings showed that the theta projection model, due to its ability to represent all three stages of creep, aligned more closely with the experimental data and was identified as a suitable choice for predicting the long-term creep. This model was able to estimate rupture time with minimal discrepancy compared to the experimental results, and displayed consistent performance under both high and low stresses. In contrast, the power law model demonstrated high accuracy during the initial and secondary stages of creep, but its predicted strains were lower than the experimental values in the tertiary stage. Moreover, at elevated stresses, the power law model exhibited significant deviation from the experimental data, while its predictions were more accurate at lower stresses.

Keywords: Creep, Finite Element Method, Abaqus, Power-Law Model, Theta Projection Model.

Received: Jul. 13, 2025; Revised: Sep. 02, 2025; Accepted: Sep. 09, 2025; Published Online: Dec. 16, 2025.

* Corresponding Author: a.taheri@iut.ac.ir

How to Cite: Mohammadi Yasamin, Taherizadeh Aboozar, Evaluation of the creep behavior of HP35Nb heat resistant steel using finite element method, Journal of Computational Methods in Engineering; 2025, 44(2), 63-78; DOI: 10.47176/jcme.44.2.1059





ارزیابی رفتار خزشی فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb با روش شبیه‌سازی اجزای محدود

یاسمین محمدی^{ID} و ابوذر طاهری‌زاده^{ID*}

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده - پیش‌بینی رفتار خزشی آلیاژهای مقاوم به حرارت در شرایط تنش و دمای بالا، نقش کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی قطعات صنعتی دارد. آسیب و گسیختگی ناگهانی می‌تواند خطرات و هزینه‌های قابل توجهی را تحمیل کند. آزمون‌های تجربی برای بررسی رفتار خزشی تحت شرایط واقعی، فرایندی زمان‌بر و پرهزینه است. بنابراین، توسعه مدل‌های عددی دقیق برای پیش‌بینی خزش، امری ضروری است. انتخاب مدلی مناسب و سازگار با ویژگی‌های خزشی ماده، تأثیر قابل توجهی در دقت پیش‌بینی‌ها دارد. لازم است باتوجه به رفتار خزشی ترکیب موردنظر مدل متناسب انتخاب شود. مدل‌های مختلفی برای توصیف رفتار خزشی توسعه یافته‌اند که در این میان، مدل قانون توان و مدل تا پروجکشن به‌عنوان دو مدل پرکاربرد شناخته می‌شوند. در این پژوهش، رفتار خزشی آلیاژ HP35Nb تحت شرایط مختلف تنش و دمای بالا با استفاده از این دو مدل شبیه‌سازی شد. نتایج با داده‌های تجربی مقاله خزشی این آلیاژ مقایسه شد تا دقت هر مدل در پیش‌بینی رفتار خزشی مشخص شود. به‌منظور تعیین شرایط کارکرد بهینه دو مدل تا پروجکشن و قانون توان در پیش‌بینی رفتار خزشی ماده به‌ویژه تعیین عملکرد آن‌ها در مراحل مختلف خزش، نتایج حل عددی مدل‌ها در شرایط مرزی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل تا پروجکشن، به دلیل توانایی در توصیف هر سه مرحله خزش به‌ویژه در دما و تنش‌های بالا، تطابق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی داشته و گزینه مناسبی برای پیش‌بینی خزش در شرایط بلندمدت است. این مدل توانست زمان گسیختگی را با دقت مناسبی پیش‌بینی و در تنش‌های بالا و پایین عملکرد پایداری داشته باشد. در مقابل، مدل قانون توان در مرحله اول و دوم خزش دقت بالایی داشت اما در مرحله سوم، کرنش‌های کمتری از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد. بعلاوه، در تنش‌های بالاتر، مدل قانون توان دچار انحراف قابل توجهی از داده‌های تجربی شد، درحالی‌که در تنش‌های پایین عملکرد بهتری داشت.

واژه‌های کلیدی: خزش، روش اجزای محدود، رفتار خزشی، مدل قانون توان، مدل تا پروجکشن.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸، اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

* نویسنده مسئول، رایانامه: a.taheri@iut.ac.ir



۱. مقدمه

پدیده خزش یکی از پدیده‌های مهم به شمار می‌آید که در بسیاری از قطعات صنعتی تحت بارگذاری‌های طولانی‌مدت و دمای بالا رخ می‌دهد. این پدیده به تغییر شکل وابسته به زمان تحت یک تنش ثابت اشاره دارد و در بسیاری از آلیاژهای مهندسی، به‌ویژه سوپرآلیاژها، آلیاژهای مقاوم به حرارت، فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای نیکل - کروم مشاهده می‌شود. اهمیت بررسی این رفتار به‌خصوص به دلیل شکست زیر نقطه تسلیم قطعات در بسیاری از کاربردها ضروری است. این مسئله به‌ویژه در صنایع توربین‌های گازی، نیروگاه‌های حرارتی، پتروشیمی و هوافضا حائز اهمیت است، زیرا عملکرد بسیاری از قطعات به حفظ استحکام و شکل اولیه آن‌ها بستگی دارد [۱].

شبیه‌سازی‌های عددی به یکی از ابزارهای کلیدی در پیش‌بینی رفتار خزشی فلزات در شرایط دمایی و تنش‌های بالا تبدیل شده‌اند و جایگزینی اقتصادی و کارآمد برای آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر محسوب می‌شوند. این شبیه‌سازی‌ها امکان ارزیابی بهینه شرایط مواد و پیش‌بینی عمر خزش را فراهم کرده و اطلاعات دقیقی درباره کرنش خزشی و تنش فون میز ارائه می‌دهند. مدل‌سازی دقیق خزش به مهندسان این امکان را می‌دهد که رفتار ماده را در شرایط مختلف بارگذاری تحلیل کرده و طراحی و نگهداری بهینه قطعات صنعتی را تسهیل کنند [۱ و ۲].

در سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی در زمینه شبیه‌سازی اجزای محدود توسعه یافته‌اند که محبوب‌ترین آن‌ها قانون توان^۱، امگا^۲، تتا پروجکشن^۳، کپانوف-رابوتنوف^۴ و سینوسی-هذلولی^۵ هستند [۳]. این مدل‌ها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی توسعه یافته و به کمک توابع ریاضی، رابطه‌ای بین تنش، دما و زمان برقرار می‌کنند. همچنین، بر پایه مکانیزم‌های فیزیکی حاکم بر خزش مانند نفوذ، لغزش مرزدانه‌ای و نابجایی‌ها توسعه یافته‌اند و سعی دارند رفتار خزش را بر اساس ساختار میکروسکوپی ماده توضیح دهند [۴].

مدل قانون توان یکی از معروف‌ترین و قدیمی‌ترین مدل‌ها بوده و به دلیل سادگی و پارامترهای کمتر نسبت به مدل‌های دیگر، به طور گسترده‌ای در نرم‌افزارهایی مانند آباکوس^۶ استفاده شده است. این مدل، نرخ کرنش خزشی را به صورت تابعی مدل قانون توان یکی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های پیش‌بینی رفتار خزشی مواد است که به دلیل ساختار ساده و تعداد کم پارامترهای موردنیاز، در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند آباکوس به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل، نرخ کرنش خزشی را بر اساس تنش و دما تعریف کرده و به طور خاص برای تحلیل مرحله دوم خزش مناسب است. سادگی در پیاده‌سازی و کارایی بالای این مدل باعث شده است که در بسیاری از مطالعات عددی و تجربی به عنوان یک روش مرجع مورد استفاده قرار گیرد [۵]. مدل قانون توان در شبیه‌سازی‌های عددی مختلف نشان داده است که می‌تواند به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی، خصوصاً در مراحل اولیه و ثانویه خزش، تطابق داشته باشد و تغییرات ریزساختاری را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند [۶]. علاوه بر این، این مدل توانایی پیش‌بینی دقیق خزش ثانویه را در مواد مختلف، از جمله آلیاژهای مس و آلومینیوم، داشته و تخمین مناسبی از نرخ کرنش و تنش ارائه می‌دهد. از نظر مکانیکی، مدل قانون توان قادر است مکانیزم‌های اساسی مانند صعود و لغزش نابجایی همراه با نفوذ جای خالی را شبیه‌سازی کرده و درک بهتری از فرآیندهای خزشی در مواد مختلف فراهم کند [۷ و ۸].

مدل تتا پروجکشن یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در تحلیل رفتار خزشی مواد محسوب می‌شود که توانایی شبیه‌سازی هر سه مرحله خزش را با دقت بالایی دارد. برخلاف مدل قانون توان، این مدل رویکرد جامع‌تر ارائه داده و کرنش خزشی را برحسب زمان از طریق توابع نمایی و چندجمله‌ای توصیف می‌کند. پارامترهای آن بر اساس داده‌های تجربی تعیین شده و انعطاف‌پذیری بالایی در برازش داده‌های آزمایشگاهی از خود نشان می‌دهد. این مدل با نرمال‌سازی منحنی‌های خزش در بازه‌های مختلف تنش و زمان شکست، بهینه‌سازی پارامترها را

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb برحسب درصد جرمی [۱۵].

C	Si	Cr	Mn	Ni	Nb	Ti	Fe
۰٫۵۱	۱٫۵۴	۲۴٫۶۹	۰٫۸۴	۳۴٫۹	۰٫۶	۰٫۰۵	بالانس

پیشین نشان داده‌اند که انتخاب مدل مناسب نقش کلیدی در تحلیل رفتار خزشی مواد دارد. از این رو، در این پژوهش دو مدل قانون توان و تتا پروجکشن به منظور شبیه‌سازی خزش در این آلیاژ به کار گرفته شد و نتایج عددی آن‌ها با داده‌های تجربی مقایسه شد تا دقت هر مدل مشخص شود.

۲. روش تحقیق

۲.۱. مواد

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی خزش، بررسی مدل‌های قانون توان و تتا و انتخاب مدل مناسب، از نتایج آزمون‌های تنش گسیختگی مقاله ژائو و همکاران روی فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb استفاده شد [۱۵]. این آلیاژ به دلیل خواص مکانیکی عالی در دمای بالا و استفاده گسترده در مواردی که نیاز به مقاومت در برابر خزش دارند، مانند صنایع هوافضا و پتروشیمی کاربرد دارد [۱۶]. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ نشان داده شده است.

نمونه‌های به کاررفته در آزمون تنش گسیختگی با استاندارد ASTM E139-11 مطابق جدول ۱ با طول گیج ۳۰ و قطر گیج ۶ میلیمتر بودند. آزمون‌ها در دماهای ثابت ۹۰۰، ۹۲۵ و ۹۵۰ درجه سلسیوس در تنش‌های ثابت ۲۲، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ و ۵۰ مگاپاسکال انجام شدند [۱۵ و ۱۶]. خواص مکانیکی و حرارتی این ترکیب شیمیایی جدول ۲ نشان داده شده است.

۲.۲. قانون توان

یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار خزشی مواد، مدل قانون توان است که در سال ۱۹۳۵ توسط بیلی بر اساس معادله نرخ آرنیوس توسعه یافت [۱۸]. این مدل عمدتاً مرحله دوم خزش را توصیف کرده و به دلیل

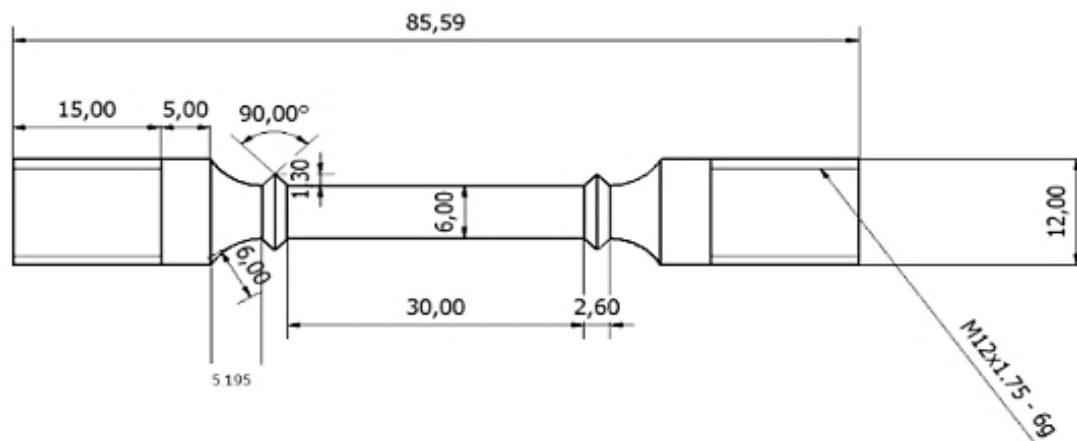
تسهیل کرده و اثرات گلویی شدن را در زمان‌های کوتاه‌تر کاهش می‌دهد. یکی از ویژگی‌های برجسته مدل تتا پروجکشن، دقت بالای آن در پیش‌بینی مرحله سوم خزش و زمان گسیختگی ماده است که برتری آن را نسبت به مدل قانون توان نشان می‌دهد. علاوه بر این، این مدل با حداقل کردن اختلاف میان نتایج عددی و تجربی، ابزاری قدرتمند برای تحلیل دقیق منحنی‌های خزش به شمار می‌رود. پیاده‌سازی این مدل نیازمند کدنویسی پیشرفته در محیط فرترن است که امکان اعمال آن در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی را فراهم می‌کند [۹-۱۱].

آلیاژ HP35Nb یکی از مواد مهندسی پرکاربرد در شرایط دما و تنش بالا است که به دلیل ترکیب شیمیایی ویژه خود، مقاومت بالایی در برابر اکسیداسیون، خوردگی و خزش نشان داده است [۱۲]. درک دقیق رفتار خزشی این آلیاژ و مدل‌سازی صحیح آن تحت شرایط مختلف تنش و دما، نقش مهمی در افزایش عمر قطعات صنعتی ساخته شده از این آلیاژ دارد [۱۳]. انتخاب یک مدل مناسب برای پیش‌بینی رفتار خزشی این آلیاژ می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی قطعات، پیشگیری از شکست‌های ناگهانی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک کند [۱۴]. مدل‌سازی رفتار خزشی به عوامل متعددی از جمله نوع آلیاژ، شرایط دمایی، بارگذاری و سطح دقت مورد نیاز در تحلیل بستگی دارد. در این پژوهش، دو مدل قانون توان و تتا پروجکشن برای پیش‌بینی رفتار خزشی آلیاژ HP35Nb مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا دقت آن‌ها در شبیه‌سازی فرآیند خزش ارزیابی شود.

این مطالعه با هدف بررسی عملکرد این دو مدل تحت شرایط دما و تنش متفاوت انجام شد. به این منظور، از داده‌های تجربی فولاد مقاوم به حرارت استفاده شد تا بهترین مدل برای توصیف رفتار خزشی آلیاژ HP35Nb شناسایی شود. مطالعات

جدول ۲. خواص مکانیکی و حرارتی فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس [۱۵].

تنش تسلیم (MPa)	انرژی فعال سازی (kJ/mol)	ضریب انبساط حرارتی (۱۷) (W/m.k)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (g/cm ³)	خواص کمی ماده
۲۳۶	۲۰۳	۳۰	۰٫۳۳	۱۲۵ – ۲۰۲٫۵ (C°۹۵۰ – C°۲۵)	۷٫۹	مقدار



شکل ۱. هندسه نمونه در استاندارد ASTM E139-11 آزمون تنش گسیختگی برحسب میلی متر [۱۶].

زمانی که تنش در طول آزمون ثابت بماند، مناسب تر بود، درحالی که معادله (۲) برای شرایطی که تنش در طول تحلیل تغییر می کند، عملکرد دقیق تری داشت. پارامترهای مدل پس از برازش با داده های تجربی و حل معادلات رگرسیونی تعیین شده و مطابق جدول ۳ خلاصه شده اند.

۲.۳. مدل تتا پروجکشن

مدل تتا پروجکشن یکی از روش های پیشرفته برای پیش بینی رفتار خزشی مواد در هر سه مرحله خزش است که نخستین بار در سال ۱۹۸۴ توسط ایوانس توسعه داده شد [۲۱]. این مدل بر پایه معادلات تجربی کرنش خزش برحسب زمان توسعه یافته و به طور گسترده برای تحلیل رفتار خزشی مواد تحت دما و تنش های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. معادلات مدل پروجکشن تتا به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\varepsilon = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1) \quad (3)$$

$$\theta_i = \exp(A_i + B_i \sigma + C_i T + D_i \sigma T) \quad (4)$$

سادگی محاسباتی و عدم نیاز به تعریف پارامترهای آسیب، در بسیاری از مطالعات تجربی و عددی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹]. همچنین، نرخ کرنش خزشی این مدل در مرحله خزش پایدار به صورت توانی به تنش و به صورت نمایی به دما وابسته بود. مدل قانون توان به دو صورت زمان (معادله (۱)) و کرنش سختی (معادله (۲)) برای پیش بینی کرنش خزشی در نرم افزار آباکوس توسعه یافت [۶].

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = A \tilde{q}^n t^m \quad (1)$$

که $\dot{\varepsilon}_{cr}$ نرخ کرنش خزش معادل تک محوری، $\tilde{q}$ تنش معادل میز، t زمان طی شده آزمون، A ، n و m ثوابت ماده وابسته به دما بودند. مقادیر A و n مثبت و $-1 < m \ll 0$ بود.

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = [A \tilde{q}^n (\bar{\varepsilon}^{cr})^m (m+1)^m]^{\frac{1}{m+1}} \quad (2)$$

معادله (۲) به معادله کرنش سختی معرف است که در اینجا $\bar{\varepsilon}^{cr}$ برابر با کرنش معادل بود [۲۰]. به طور کلی، انتخاب معادله مناسب به شرایط بارگذاری نمونه بستگی داشت. معادله (۱)

جدول ۳. پارامترهای معادله قانون توان در تعیین رفتار خزشی فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb [۱۵].

T(°C)	A((MPa) ⁻ⁿ h ⁻¹)	n	m
۹۰۰	$1 \times 10^{-11.89}$	۵.۱۶	۰
۹۲۵	2.625×10^{-12}	۵.۹۰۵	۰
۹۵۰	9.184×10^{-12}	۵.۸۰۲	۰

جدول ۴. پارامترهای مدل خزشی تا پروجکشن در فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb.

T(°C)	σ (MPa)	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
۹۰۰	۳۰	-۲۶۴.۱	-۳	9.81×10^{-6}	۰.۰۲۹
۹۲۵	۳۰	۱۳.۸۴	-۰.۰۴۵	۱۴.۱۴	۰.۰۰۴۵
۹۵۰	۲۲	-6.59×10^{-5}	9.82×10^{-9}	۰.۰۵۲	۰.۰۰۴۸

$$t_r = \frac{1}{\theta_4} \ln\left(\frac{\varepsilon}{\theta_3} + 1\right) \quad (۵)$$

$$\omega = \frac{t}{t_r} = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{\theta_3} + 1\right)}{\ln\left(\frac{\varepsilon_r}{\theta_3} + 1\right)} \quad (۶)$$

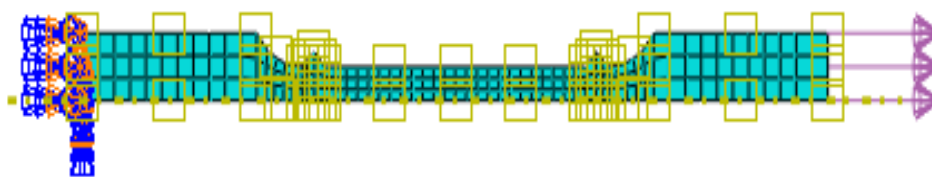
که در این معادله t_r برابر با عمر گسیختگی، t برابر با زمان طی شده در آزمون، ω ($0 \leq \omega < 1$) برابر با آسیب خزشی و ε_r برابر با شکل پذیری خزشی می‌باشند [۲۳]. برای شبیه‌سازی مدل تا، پارامترهای آن با استفاده از داده‌های تجربی استخراج شده از نمودارهای کرنش-زمان برازش شدند. مقادیر نهایی این پارامترها در جدول ۴ ارائه شده است.

۴.۲. تنظیمات حل عددی

به منظور شبیه‌سازی عددی رفتار خزشی، از مدل تقارن محوری در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. در این مدل، نمونه‌ها تحت تنش‌های کششی ثابت تک‌محوری با مقادیر ۲۲، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۵۰ مگاپاسکال قرار گرفتند. آزمون‌ها در دمای ثابت ۹۲۵، ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سلسیوس انجام شدند تا تأثیر دما بر رفتار خزشی ماده بررسی شود. همچنین، از شبکه نوع CAX4 که یک المان

که σ برابر با تنش اعمالی و T برابر با دمای مورد آزمایش برحسب درجه کلوین بود. مطابق معادله (۴) θ_i ($i = 1$ تا ۴) برابر با چهار مضرب تا بود که از نتایج تجربی به دست آمد. این معادله را می‌توان به دو قسمت $\theta_1(1 - e^{-\theta_2 t})$ برای تعیین خزش در مرحله اول تقسیم کرد که θ_1 برابر با خزش نهایی در مرحله اول و θ_2 شکل مولفه خزش اولیه بود و $\theta_3(e^{\theta_4 t} - 1)$ برای تعیین خزش در مرحله سوم بود که θ_3 بیان‌کننده کرنش خزش در مرحله سوم و θ_4 بیان‌کننده انحنا و شکل ماده در مرحله سوم بود [۲۲].

هر یک از ضرایب تا از آزمون‌های خزش تک‌محوری تحت شرایط تنش و دمای ثابت استخراج شده‌اند. این ضرایب به‌منظور کاهش اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی تنظیم شده و نقش کلیدی در افزایش دقت پیش‌بینی مدل ایفا می‌کنند. این مدل با نرمال‌سازی منحنی‌های خزش بر اساس کرنش و زمان شکست، منحنی‌های خزش را به یک نقطه مناسب فشرده کرده و از اثر گلوپی شدن در مراحل پایانی خزش جلوگیری می‌کند (۱۰). میزان آسیب خزشی در این مدل با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۲. شبکه بندی و شرایط مرزی نمونه.

مدل‌های خزشی، منجر به افزایش دقت تحلیل و کاهش خطای شبیه‌سازی شد.

۳. نتایج و بحث

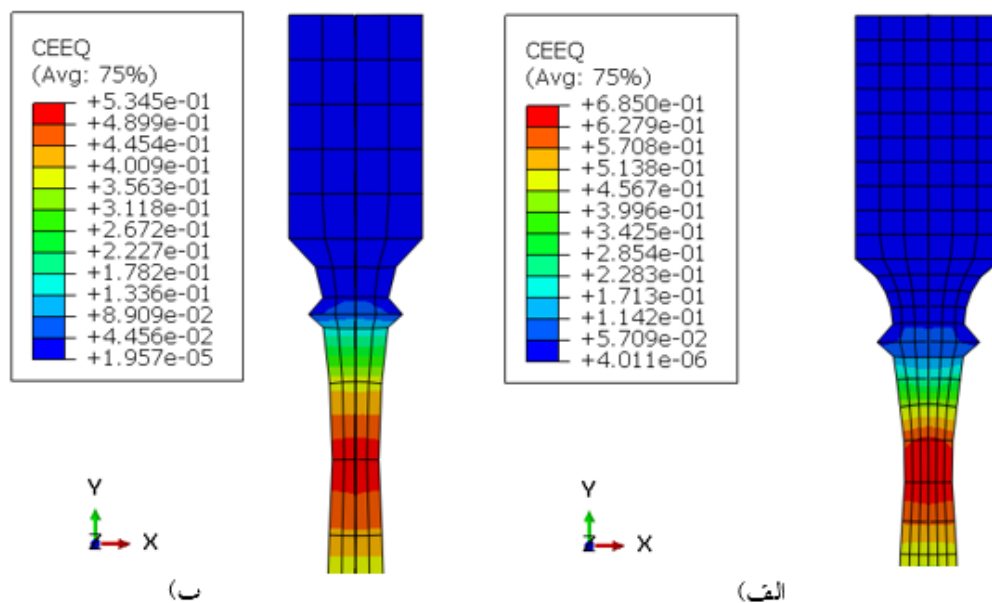
نتایج شبیه‌سازی روی فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb شامل سه مرحله خزش بود که به‌طورکلی با افزایش دما و تنش، مرحله اول خزش، کاهش و مرحله سوم افزایش یافت. با استفاده از این نتایج به طور جامع به بررسی رفتار خزشی با دو مدل قانون توان و تتا پروجکشن پرداخته شد.

۳.۱. تاثیر شبکه اجزای محدود

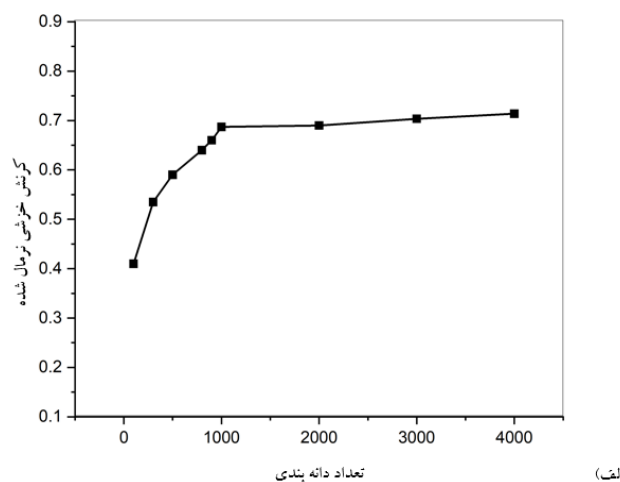
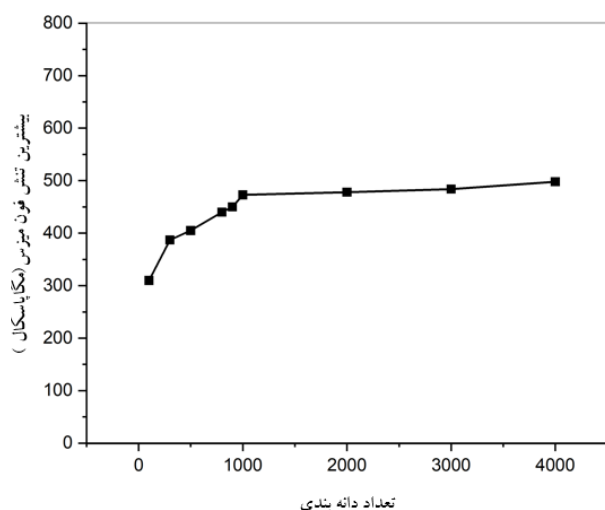
به‌منظور تعیین اندازه شبکه مناسب، المان‌ها با اندازه‌های مختلف با استفاده از هندسه ASTM E139-11 تحت شرایط مرزی یکسان شبیه‌سازی مقایسه شدند. برای اطمینان از همگرایی شبیه‌سازی، نمودارهای حداکثر تنش فون میزز و منحنی کرنش خزشی رسم شد. هدف از نمودارهای همگرایی تأیید صحت شبیه‌سازی بود که با ارائه کرنش‌های به‌دست‌آمده در هر المان و ادامه تا رسیدن به‌اندازه بهینه که در آن نتایج دیگر تغییر نمی‌کرد، تضمین شد. هدف از این نمودارها، ارزیابی دقت شبیه‌سازی بود که از طریق تحلیل کرنش‌های حاصل در هر المان بررسی شد تا اندازه بهینه‌ای تعیین گردد که در آن، نتایج بدون تغییر باقی بمانند.

مطابق شکل ۳، یافته‌ها نشان داد که استفاده از ۱۰۰۰ المان در نمونه، شرایط مطلوبی برای دستیابی به نتایج واقعی فراهم کرد. همچنین، افزایش تعداد المان‌ها تا ۴۰۰۰ تأثیر محسوسی بر نتایج نداشت و در برخی موارد، مقادیر تنش‌های محاسبه‌شده

چهارگرمی تقارن محوری است، استفاده شد. این نوع شبکه‌بندی به دلیل قابلیت بالا در تحلیل‌های تقارن محوری و دقت مناسب در نواحی با گرادین تنش بالا انتخاب شد. مطابق شکل ۲، شبکه اجزای محدود انجام‌شده به‌گونه‌ای تنظیم شد که دقت تحلیل در مناطق پرتنش، به‌ویژه ناحیه گلوپی شدن، افزایش یابد و همگرایی مناسب در حل‌های عددی حاصل شود [۲۴]. همچنین، برای افزایش دقت در تحلیل خزش، در مناطق بحرانی (محل تمرکز تنش و کرنش بالا) از شبکه‌های ریزتر استفاده شد. این روش باعث بهبود پیش‌بینی تغییرات تنش متمرکز و دقت بیشتر در تحلیل رفتار طولانی‌مدت فولاد مقاوم به حرارت HP35Nb شد. پس از بررسی همگرایی شبکه، اندازه بهینه شبکه برای این شبیه‌سازی ۰/۸ و ۰/۶ میلی‌متر تعیین شد تا توازن بین دقت تحلیل و زمان محاسباتی حفظ شود. در ادامه، مدل قانون توان از تنظیمات نرم افزار و مدل تتا پروجکشن با استفاده از سابروتین‌های CREEP و USDFLD به این نرم افزار اضافه شد که شامل ۸ متغیر حالت مورد نیاز برای محاسبات بود و با استفاده از گزینه DEPVAR تنظیم شد [۲۵]. پارامترهای کلیدی خروجی از تجزیه و تحلیل این پژوهش شامل کرنش خزشی، توزیع تنش فون میزز و نرخ کرنش خزشی بودند. برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی، نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شدند. بررسی همگرایی شبکه، مقایسه نتایج مدل‌ها با نمودارهای تجربی کرنش-زمان، و تحلیل تأثیر تعداد المان‌ها و شرایط مرزی، از جمله روش‌های اعتبارسنجی مورد استفاده در این پژوهش بودند. این نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از شبکه‌های بهینه، همراه با تنظیمات دقیق



شکل ۳. مقدار کرنش خزشی و توزیع آن در الف) تعداد المان ۱۰۰۰ ب) تعداد المان ۳۰۰.

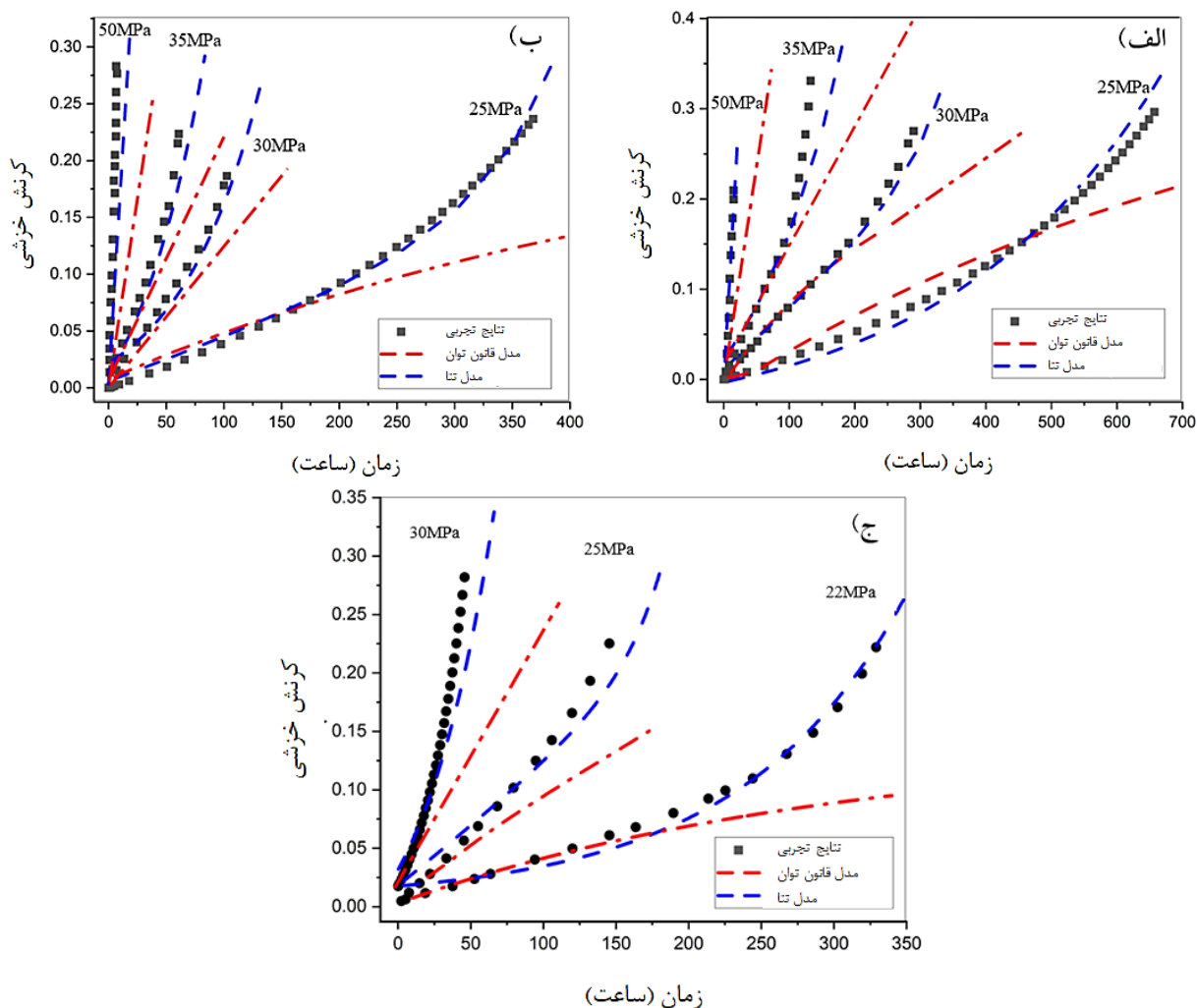


شکل ۴. تاثیر تعداد المانها در الف) کرنش خزشی نرمال شده و ب) تنش های فون میز

۳.۲. نتایج شبیه سازی تغییر فرم خزشی

بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی خزش با استفاده از دو مدل قانون توان و تئوری پروجکشن عملکرد این مدلها در سطوح مختلف دما و تنش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از آنالیز آماری ANOVA برای ارزیابی میزان تطابق کرنش خزش پیش بینی شده توسط این مدلها به عنوان تابعی از

بیش از حد انتظار بودند. بر این اساس، حداقل تعداد المان بدون ایجاد تغییر در نتایج، مقدار ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد که اندازه آنها در بازه ۱/۲۵ تا ۱/۷۵ میلی متر قرار داشت. با تعیین اندازه بهینه المانها، نیاز به کاهش بیش از حد اندازه آنها و انجام شبیه سازیهای زمان بر و غیر ضروری از بین رفت. شکل ۴ نیز تاثیر اندازه های مختلف المان بر کرنش های خزشی نرمال شده و بیشینه تنش فون میز را نمایش می دهد.



شکل ۵. مقایسه کرنش خزش با دو مدل قانون توان و تنا پروجکشن با نتایج تجربی در دماهای الف (۹۰۰، ب) ۹۲۵ و ج) ۹۵۰ سلسیوس در تنش های مختلف.

وسیع‌تری از تنش‌ها و دماها توانست با ضریب همبستگی $R^2 = 0.98$ ، به‌عنوان یک مدل قابل‌اعتماد برای شبیه‌سازی خزش عمل کرد. در مقابل، مدل قانون توان در تنش‌های بالا (۳۵ و ۵۰ مگاپاسکال) اختلاف قابل‌توجهی با داده‌های تجربی داشت و نتوانست در هر سه مرحله خزش تطابق مناسبی ارائه دهد. هرچند، در تنش‌های پایین عملکرد بهتری از خود نشان داد و توانست پیش‌بینی قابل‌قبولی از مراحل اول و دوم خزش ارائه کند، اما کرنش‌های پیش‌بینی‌شده در مرحله گسیختگی همواره کمتر از مقادیر تجربی بودند. این مسئله نشان‌دهنده عدم لحاظ شدن این مرحله در مدل قانون توان بود.

زمان با داده‌های تجربی مقاله استفاده شد. در ادامه، رفتار هر مدل در مراحل مختلف خزش تحلیل شد.

در این مقایسه، مدل تنا بیشترین میزان تطابق را با داده‌های تجربی نشان داد، درحالی‌که مدل قانون توان عمدتاً رفتار خزشی ماده را در مراحل اول و دوم بررسی کرده و مرحله سوم را نادیده گرفته بود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که مدل قانون توان در برخی سطوح تنش، رفتاری سهمی و در برخی دیگر، رفتار خطی از خود نشان داد.

مطابق شکل ۵، مدل تنا در مقایسه با مدل قانون توان، بیشترین تطابق را با نتایج تجربی داشت. این مدل در رنج

ماده کمک کرد که با یافته‌های شبیه‌سازی مدل تتا در این مطالعه همسو بودند.

در مطالعه‌ای دیگر، روبان و همکاران [۲۸]، به مقایسه مدل تتا با مدل قانون توان پرداختند. آن‌ها نشان دادند درحالی‌که هر دو مدل قانون توان و تتا دارای مزایای خود بودند، ترکیب این دو مدل نتایج پیش‌بینی بهتری را برای رفتار خزش در مواد به همراه داشت. باین‌حال، عملکرد هرمدل تحت شرایط مرزی مختلف بررسی نشد. به همین منظور، نتایج آن‌ها در حالت کلی بوده و برای تمامی نمودارهای کرنش خزشی قابل استفاده نبود. لا و همکاران [۲۹]، مدل تتا را به عنوان یک جایگزین محبوب برای مدل های خزش توان برای پیش‌بینی رفتار خزش پدیدار دانستند. این مدل در مقایسه با مدل های ساده نظیر قانون توان، به ویژه برای اتصالات جوش داده شده در شرایط خزش، دقت و قابلیت پیش‌بینی بهبود یافته‌ای را ارائه داده است. باین‌حال، رفتار جامع این مدل‌ها در شرایط دمایی و تنش متفاوت مورد بررسی قرار نگرفت. همچنین مقایسه عملکرد آن‌ها در هر مرحله خزش نادیده گرفته شد. اسمیت و همکاران [۳۰] رفتار خزشی آلیاژهای نیکل-کروم را در دماهای بالا بررسی کرده و نشان دادند که مدل قانون توان تنها در مرحله دوم خزش دقت مناسبی داشت، اما در مرحله سوم دقت آن کاهش یافت. لیو و همکاران [۳۱] از مدل تتا پروجکشن برای پیش‌بینی خزش در سوپرآلیاژهای پایه نیکل استفاده کردند و نتایج نشان داد که این مدل قادر است با دقت بالایی هر سه مرحله خزش را توصیف کند.

۳.۳. نتایج شبیه‌سازی زمان گسیختگی

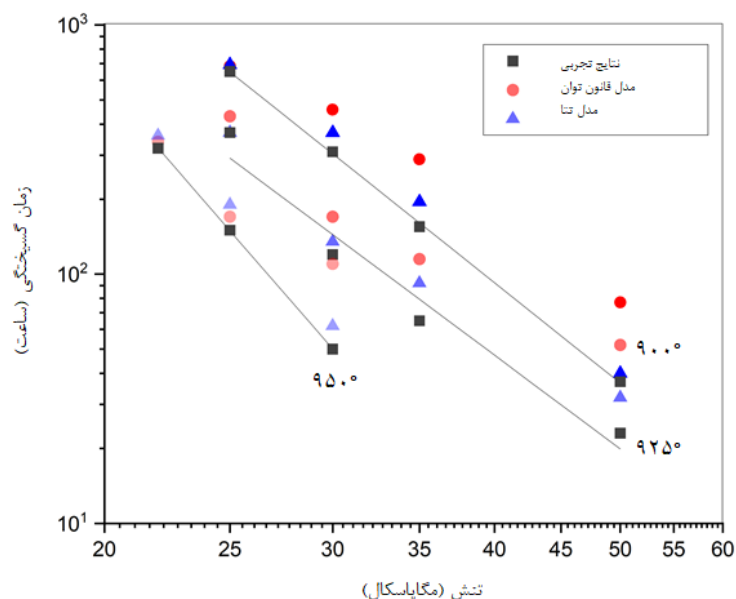
نتایج مقایسه زمان گسیختگی مدل‌ها، تفاوت‌های قابل‌توجهی را در قابلیت‌های پیش‌بینی، پیچیدگی و عملکرد آن‌ها در شرایط تنش متفاوت نشان داد. این بینش برای مهندسان و طراحان در انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی زمان گسیختگی مواد در کاربردهای عملی بسیار مهم بود.

مطابق شکل ۱، مدل تتا پروجکشن نسبت به مدل قانون توان، هم‌خوانی بیشتری با داده‌های تجربی نشان داد. هر دو

با افزایش دما تا ۹۵۰ درجه (شکل ۱-ج)، مدل تتا در پیش‌بینی مرحله اول خزش کمی ضعیف‌تر عمل کرد، اما همچنان مدل قابل‌اعتمادی باقی ماند. در مقابل، مدل قانون توان به دلیل کوتاه‌تر شدن مرحله اول خزش در دماهای بالا، اختلاف بیشتری با داده‌های تجربی پیدا کرد. باین‌حال، در تنش ۲۲ مگاپاسکال، توانست در مرحله اول خزش تطابق دقیق‌تری نسبت به مدل تتا ارائه دهد.

علی‌رغم دقت بالای مدل تتا در پیش‌بینی رفتار خزشی ماده در این مطالعه، پارامترهای این مدل وابسته به دما و تنش بودند و با تغییر هریک از شرایط مرزی دما و تنش، نیاز به برازش مجدد بود که بر پیچیدگی محاسباتی افزود [۲۶]. همچنین، این مدل نیاز به کالیبراسیون با استفاده از داده‌های تجربی داشت. این فرآیند اغلب زمان‌بر و نیاز به محاسبات دقیق بود. به خصوص زمانی که آزمون‌های متعدد تجربی در دماها و تنش‌های مختلف مورد نیاز بود [۱۱].

کیم و همکاران [۲۷]، با تجزیه و تحلیل مدل تتا روی Hastelloy-X، نشان دادند که مدل تتا به طور دقیق منحنی‌های کرنش خزش را توصیف کرد. این مدل با وابستگی به تنش و دما، درونیایی و برون‌یابی داده‌های خزش مناسب ساخت. آن‌ها نشان دادند مدل تتا به دلیل قابلیت‌های مدل‌سازی جامع و دقت در پیش‌بینی رفتار خزشی مواد تحت شرایط تنش متفاوت، عموماً برای تجزیه و تحلیل دقیق در نظر گرفته شده بود. همچنین آن‌ها اشاره کردند که انتخاب مدل به نیازهای پروژه، داده‌های موجود و سطح دقت مطلوب در تحلیل بستگی دارد. برای کاربردهای در دمای بالا، مدل تتا مزایای قابل‌توجهی در درک رفتار خزش و پیش‌بینی عمر مواد فراهم کرد که با نتایج این شبیه‌سازی همسو بود. همچنین در پژوهشی مشابه، دی و همکاران [۱۱]، به تحلیل مدل تتا پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مدل تتا از پارامترهایی استفاده کرده که شامل کرنش خزش اولیه و زمان است که قابلیت‌های پیش‌بینی آن را افزایش داده است. همچنین، این مدل با پیش‌بینی زمان خزش در مرحله خزش پایدار و گسیختگی به ارزیابی یکپارچه خزش در ساختار



شکل ۶. نمودار لگاریتم مقایسه زمان گسیختگی برحسب لگاریتم تنش در مدل های خزشی قانون توان و تتا پروجکشن.

دویار و همکاران [۳۲]، نشان دادند که زمان گسیختگی خزش می‌تواند به طور قابل توجهی به عملیات حرارتی انجام شده و ترکیب شیمیایی متفاوت، اختلاف داشته باشد. همچنین آن‌ها نشان دادند که در این پیش‌بینی، مدل توان نتوانست همگرایی قابل قبولی در شرایط مختلف را نشان دهد که با نتایج این پژوهش هم‌راستا بود. هیوشی و همکاران [۳۳] با تجزیه و تحلیل رفتار خزش با مدل تتا روی $Ti43Al5V4Nb$ ، نشان دادند که این مدل به طور دقیق زمان گسیختگی خزش را پیش‌بینی کرد.

۴.۳. پیش‌بینی توزیع پارامترهای خزشی

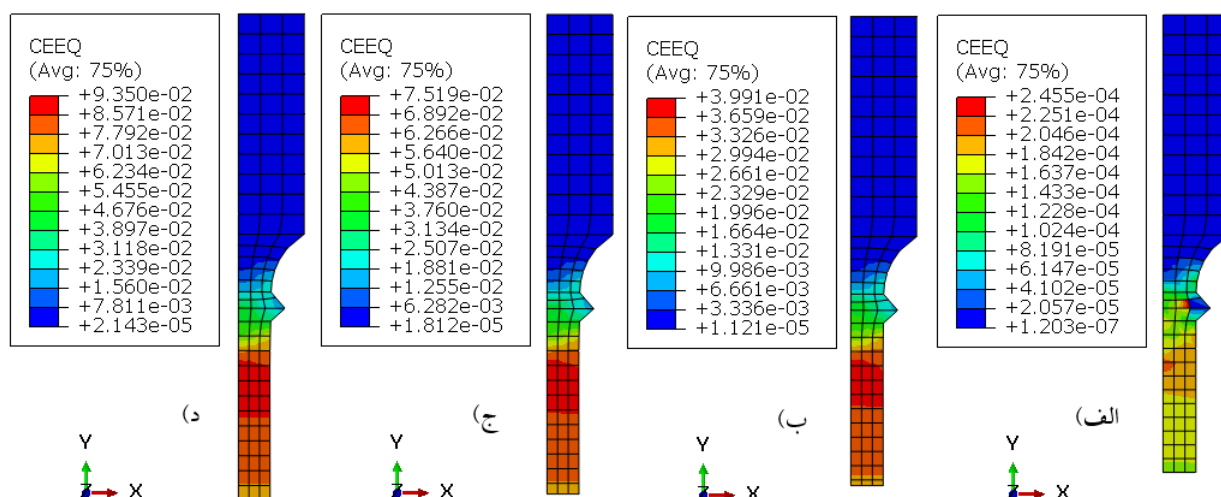
به منظور بررسی جامع رفتار خزشی دو مدل قانون توان و تتا پروجکشن لازم است فقط به کرنش خزش بسنده نکرده و توزیع تنش فون میزز و محل شروع آسیب را در دو مدل بررسی و مقایسه کرده که دید عمیق‌تری به مکانیزم خرابی ارائه دهد. لازم به ذکر است این مقایسه تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

مطابق شکل‌های ۷ و ۸، معیار کرنش مؤثر خزش CEEQ، برای دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس و دو مدل خزش قانون توان و تتا پروجکشن در دو بازه زمانی ۱۰۰ و ۱۳۰

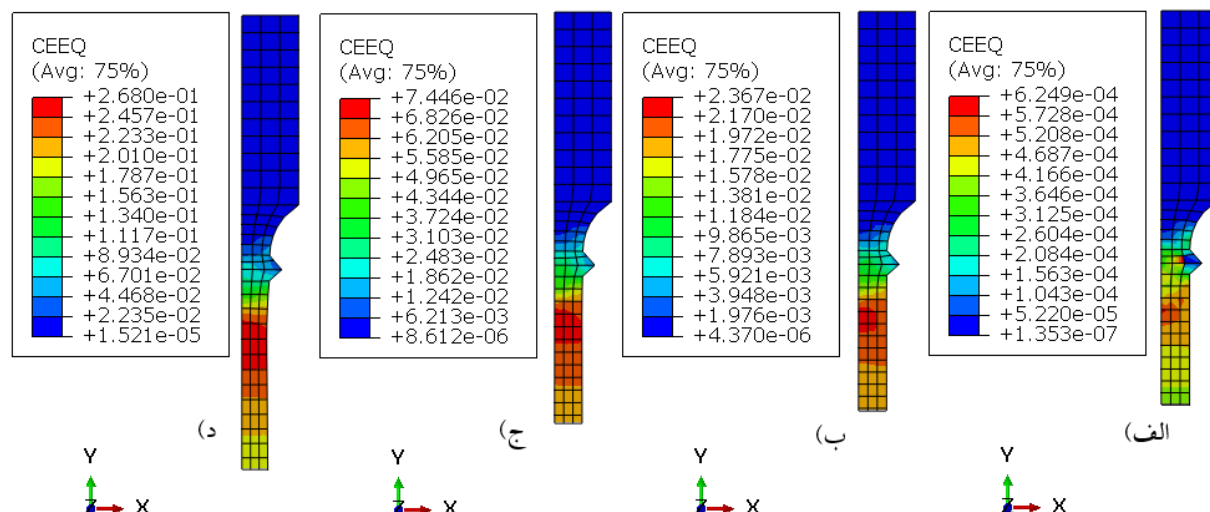
مدل در محدوده تنش‌های پایین (۲۵ تا ۳۵ مگاپاسکال)، پیش‌بینی‌های قابل قبولی ارائه داده‌اند، اما مدل تتا دقت بالاتری را نشان داد. با افزایش تنش به مقادیر بالاتر (بیشتر از ۳۵ مگاپاسکال)، مدل قانون توان دچار افت دقت شده و زمان گسیختگی را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد. این انحراف در تنش‌های ۴۵ و ۵۰ مگاپاسکال کاملاً مشهود بود، جایی که مدل قانون توان مقدار زمان گسیختگی بسیار بیشتری نسبت به داده‌های تجربی ارائه داده بود.

در مقابل، مدل تتا پروجکشن در تمامی بازه‌های تنشی به داده‌های تجربی نزدیک‌تر بوده و توانسته روند کلی تغییرات زمان گسیختگی را به درستی پیش‌بینی کند. این موضوع نشان داد که مدل تتا پروجکشن در مقایسه با مدل قانون توان، در شبیه‌سازی رفتار خزشی ماده به‌ویژه در مراحل نهایی خزش، عملکرد دقیق‌تری داشت.

به‌طور کلی، یافته‌ها تأکید کرد که مدل تتا پروجکشن می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای پیش‌بینی زمان گسیختگی در شرایط تنش‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد، درحالی‌که مدل قانون توان تنها در تنش‌های پایین‌تر عملکرد مطلوبی داشت و در تنش‌های بالا دقت آن کاهش یافت.



شکل ۷. توزیع خطوط CEEQ در دمای ۹۵° درجه سلسیوس و تنش ۲۲ مگاپاسکال با مدل قانون توان در (الف) ثانیه های اولیه، (ب) ۱۰۰ ساعت، (ج) ۲۲۰ ساعت و (د) زمان پایانی.



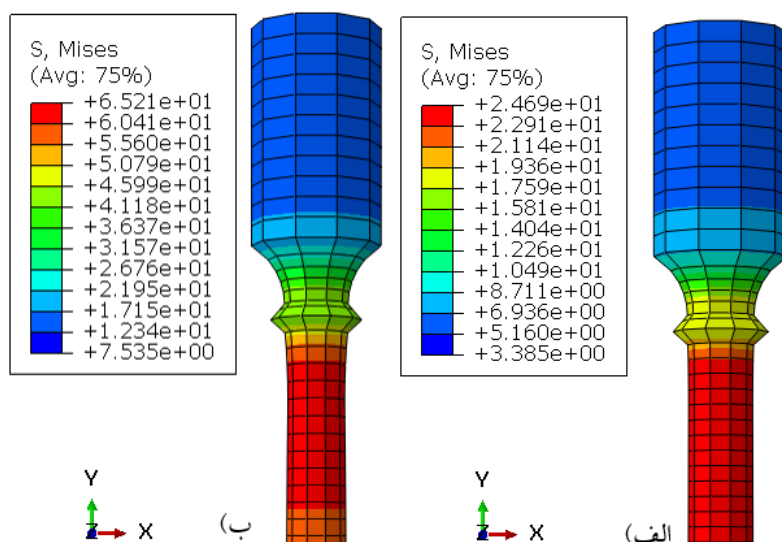
شکل ۸. توزیع خطوط CEEQ در دمای ۹۵° درجه سلسیوس و تنش ۲۲ مگاپاسکال با مدل تتا پروجکشن در (الف) ثانیه های اولیه، (ب) ۱۰۰ ساعت، (ج) ۲۲۰ ساعت و (د) زمان پایانی.

شبهه سازی، میزان کرنش خزشی افزایش یافته و به سمت نقاط بیشتر از نمونه گسترش یافت، اما مدل قانون توان همچنان در مرحله سوم خزش عملکرد محدودی داشته و تمرکز اصلی آن روی مراحل اولیه و ثانویه خزش بود.

در شکل نیز که مربوط به مدل تتا پروجکشن است، می توان مشاهده کرد که این مدل توزیع همگن تر و دقیق تری از کرنش خزشی در تمام نواحی به ویژه در ناحیه گلوئی شدن

ساعت نمایش داده شده است. این توزیع ها نشان دهنده میزان تغییر شکل خزشی در نمونه تحت تنش ۲۳ مگاپاسکال بودند.

مطابق شکل که نتایج مدل قانون توان را نشان می دهد، مشاهده شد که در زمان های اولیه (۱۰۰ ساعت)، بیشترین کرنش مؤثر خزشی در ناحیه گلوئی نمونه متمرکز شده بود. این نواحی با رنگ های قرمز و نارنجی نشان دهنده بیشترین میزان کرنش بودند. با گذشت زمان تا ۲۲۰ ساعت و زمان پایانی



شکل ۹. کانتوهای توزیع تنش در زمان پایانی با مدل های الف) قانون توان و ب) تتا پروجکشن.

حدود ۵۲ مگاپاسکال بود. با این حال، توزیع تنش در کل نمونه نسبتاً یکنواخت بود و شیب تغییرات تنش نسبت به ارتفاع نمونه ملایم تر به نظر رسید.

توزیع تنش در مدل تتا پروجکشن، پایداری بیشتری را نشان داد. علاوه بر این، توزیع تنش در این مدل به گونه ای بود که مناطق بحرانی بیشتری در بخش میانی و پایینی نمونه درگیر شد که می تواند نشان دهنده مدل سازی دقیق تر فرایند خزش بود. این موضوع تطابق بهتری با داده های تجربی داشته و نشان داد که مدل تتا پروجکشن رفتار ماده را در مرحله نهایی خزش به طور واقع بینانه تری شبیه سازی کرد.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از نتایج آزمون تنش گسیختگی از مقاله ژائو و همکاران، رفتار خزشی آلیاژ HP35Nb تحت شرایط مختلف تنش و دما با دو مدل عددی قانون توان و تتا پروجکشن مورد بررسی قرار گرفت. مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس انجام و برای اولین بار پارامترهای مدل ها برای پیش بینی رفتار خزشی این ترکیب شیمیایی برآورد شد. با نتایج حل عددی دقت هر دو مدل در پیش بینی کرنش خزشی، نرخ کرنش و توزیع تنش فون میزز ارزیابی شد. به منظور افزایش

(منطقه قرمز رنگ) و اطراف آن (ناحیه نارنجی) ارائه داده است. این منطقه با توجه به افزایش نیروهای وارده نسبت به سطح مقطع، ترکیبی از تمرکز تنش و نرخ خزش بالا بوده در نتیجه دارای مقدار بزرگتری از کرنش خزشی بود. در ۱۰۰ ساعت اولیه، الگوی کرنش شباهت زیادی به مدل قانون توان داشت، اما با رسیدن به ۲۲۰ ساعت و زمان پایانی شبیه سازی، میزان گسترش نواحی پرتنش دقیق تر بود و همخوان تر با داده های تجربی بود. این مدل قابلیت پیش بینی بهتری برای مرحله سوم خزش داد و کرنش های بیشتری در نواحی بحرانی ماده (ناحیه ی گلوپی) نشان داد.

شکل ۱۰، توزیع تنش فون میزز را در زمان پایانی شبیه سازی برای دو مدل خزشی قانون توان و تتا پروجکشن نمایش می دهد. این نمودار نشان دهنده چگونگی تغییرات توزیع تنش در نمونه تحت اثر خزش در دو مدل در مرحله نهایی بود.

مطابق شکل (الف)، در مدل قانون توان مشاهده شد که بیشترین مقدار تنش در نواحی گلوپی نمونه بود. این توزیع نشان دهنده ناپایداری ماده در این ناحیه و احتمال بالای گسیختگی در این بخش بود. مقدار حداکثری تنش در این مدل حدود ۶۵ مگاپاسکال بود که نسبت به مدل تتا پروجکشن (شکل ب)) مقدار بیشتری را نشان داد. این مقدار با مدل تتا

اختلافاتی را در پیش‌بینی کرنش خزش و نرخ آن گزارش داد.

۵. مقایسه نتایج CEEQ نشان داد که مدل قانون توان کرنش‌های کمتری در مرحله سوم خزش پیش‌بینی کرد که نشان‌دهنده ضعف آن در تحلیل‌های طولانی‌مدت بود. در مقابل، مدل تتا پروجکشن الگوی دقیق‌تری از کرنش خزشی ارائه داد و عملکرد بهتری در تحلیل‌های بلندمدت داشت.

۶. بررسی توزیع تنش‌ها نشان داد که مدل قانون توان، تنش‌های بالاتری را در نواحی بحرانی پیش‌بینی کرد اما مرحله سوم خزش را به‌درستی مدل‌سازی نکرد. در مقابل، مدل تتا پروجکشن توزیع تنش بهتری ارائه داد و پایداری بهتری را در ماده نشان داد که آن را به گزینه‌ای مناسب‌تر برای تحلیل شرایط تنش بالا و مراحل پایانی خزش تبدیل کرد.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که تأثیر ساختار ریزدانه‌ای آلیاژ HP35Nb و مکانیزم‌های دقیق‌تر آسیب خزشی بررسی شود. همچنین، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بهتر رفتار خزشی می‌تواند مسیر جدیدی برای تحقیقات آینده باشد.

دقت تحلیل، شبکه‌بندی بهینه انتخاب و برای مدل تتا پروجکشن از سابروتین‌های CREEP و USDFLD استفاده شد. این پژوهش نشان داد که انتخاب مدل مناسب در شبیه‌سازی خزش، تأثیر قابل‌توجهی بر دقت تحلیل‌ها دارد. نتایج این مقایسه به‌صورت زیر خلاصه شده‌اند.

۱. مدل قانون توان در برخی سطوح تنش، رفتاری سهمی و در برخی دیگر، رفتار خطی از خود نشان داد. این مدل با افزایش تنش و زیادشدن مرحله سوم خزش اختلاف بیشتری با نتایج تجربی نشان داد. با این حال در مراحل اول و خزش گذرا طولانی‌مدت عملکرد قابل‌قبولی داشت.

۲. مدل تتا پروجکشن با ضریب همبستگی $R^2 = 0.98$ دقت بالایی در پیش‌بینی هر سه مرحله خزش داشت و برای تحلیل‌های بلندمدت در دما و تنش‌های بالا مناسب‌ترین گزینه بود. این مدل به‌ویژه برای رفتار خزش خطی که در آن نرخ کرنش خزشی در طول زمان نسبتاً ثابت بود، مؤثر بود.

۳. در پیش‌بینی زمان گسیختگی نیز مدل تتا پروجکشن توانست با حداقل اختلاف نسبت به داده‌های تجربی آن را پیش‌بینی کند. این امر به دلیل توانایی این مدل در پیش‌بینی مرحله سوم خزش بود.

۴. مدل تتا پروجکشن در تنش‌های پایین (۲۵ مگاپاسکال) و دمای کمتر، با توجه به مرحله اول خزش بلندمدت،

واژه‌نامه

1. Power law
2. MPC Omega
3. Theta projection

4. Kachanov–Rabotnov
5. Hyperbolic sine
6. Abaqus

مراجع

1. Wang XY, Wang X, Zhang XC, Zhu SF. Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov–Rabotnov creep damage model. Nucl Sci Tech. 2019;30(4). <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0586-2>
2. Saberi E, Nakhodchi S, Dargahi A, Nikbin K.

- Predicting stress and creep life in Inconel 718 blade-disk attachments. Eng Fail Anal. 2020;108:104226. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104226>
3. Hu M, Li K, Li S, Cai Z, Pan J. Stress relief investigation using creep model considering back stress in welded rotor. J Constr Steel Res. 2020;169:106017.

- https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106017
4. Mukherjee S, Nuhi M, Dasgupta A, Modarres M. Creep constitutive models suitable for solder alloys in electronic assemblies. *J Electron Packag.* 2016;138(3):30801. <https://doi.org/10.1115/1.4033375>
5. Liang L, Feng Z, Zhang H, Chen Z, Qian C. Development and application of a power law constitutive model for eddy current dampers. *Comput Model Eng Sci.* 2024;138(3):1–10. <https://doi.org/10.32604/cmescs.2023.031260>
6. Faghihi F, Numanović M, Knobloch M. Effect of thermal creep on the fire resistance of steel columns. *Fire Saf J.* 2023;137:103750. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103750>
7. Ahmad MIM, Sosa JLC, Rongong JA. Characterisation of creep behaviour using the power law model in copper alloy. *J Mech Eng Sci.* 2017;11(1):2503–10. <https://doi.org/10.15282/jmes.11.1.2017.9.0230>
8. Keralavarma SM, Cagin T, Arsenlis A, Benzerga AA. Power-law creep from discrete dislocation dynamics. *Phys Rev Lett.* 2012;109(26):265504. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.109.265504>
9. Kim DH, Lee CM, Kim JH, Kim SH, Yeo S, Lee YK. Thermal creep analysis and correlation development for manufactured HT9 cladding. *J Nucl Mater.* 2024;593:154999. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2024.154999>
10. Harrison WJ, Evans PWJ. Application of the theta projection method to creep modelling using Abaqus. In: *Abaqus Regional Users Conference*; 2007; Swansea, UK. Swansea: Swansea University; 2007. p. 1–15. (DOI unavailable)
11. Day WD, Gordon AP. A modified theta projection creep model for a nickel-based super-alloy. *Proc ASME Turbo Expo.* 2013;7 A:1–9. <https://doi.org/10.1115/GT2013-94805>
12. de Santana PMB, Della Rovere CA, Albuquerque EC de MC, de Souza CAC. Evaluation of the effects of the addition of Al, Ti, and Zr on microstructure, carburization and creep resistance of the HPNb alloy. *J Mater Res Technol.* 2024;30:461–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.234>
13. Harandi AN, Eslami A, Bahrami A, Bakhtafrouz A, Yazdan Mehr M. Failure Analysis of Two HP-Nb Heat-Resistant Tubes after 46,000 h Exposure to Reformer Service Conditions. *Metals (Basel).* 2023;13(2):228. <https://doi.org/10.3390/met13020228>
14. Shin D, Yamamoto Y, Brady MP, Lee S, Haynes JA. Modern data analytics approach to predict creep of high-temperature alloys. *Acta Mater.* 2019;168:321–30. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.02.017>
15. Zhao Y, Gong J, Yong J, Wang X, Shen L, Li Q. Creep behaviours of Cr25Ni35Nb and Cr35Ni45Nb alloys predicted by modified theta method. *Mater Sci Eng A.* 2016;649:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.036>
16. Ro U, Kim JH, Lee H, Kang SJ, Kim MK. Creep–fatigue damage evaluation of Grade 91 steel using interrupted creep–fatigue test. In: *ASME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP)*; 2018; New York, USA. New York: ASME; 2018. p. 5–10. <https://doi.org/10.1115/PVP2018-84561>
17. Niknam B, Haji Aboutalebi F, Ma W, Masoudi Nejad R. Effect of variations internal pressure on cracking radiant coils distortion. *Structures.* 2021;34:4986–98. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.083>
18. Bailey RW. The utilization of creep test data in engineering design. *Proc Inst Mech Eng.* 1935;131(1):131–349. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1935_131_01_2_02
19. Golan O, Arbel A, Eliezer D, Moreno D. The applicability of Norton's creep power law and its modified version to a single-crystal superalloy type CMSX-2. *Mater Sci Eng A.* 1996;216(1–2):125–30. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10400-7](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10400-7)
20. Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Ichkova MD. Modeling of strain hardening and creep behaviour of 2024T3 aluminium alloy at room and high temperatures. *Comput Mater Sci.* 2014;83:381–93. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.11.057>
21. Evans RW, Beden I, Wilshire B. Creep Life Prediction for 0.5 Cr–0.5 Mo–0.25 V Ferritic Steel. *Creep Fract Eng Mater Struct.* 1984;2:1277–90. <https://doi.org/10.4028/72-7485>
22. Borges GO, Barboza MJR, Reis DAP. Mathematical Modeling Applying ν Concept and θ Projection to Creep of Ti-6Al-4V Alloy. *Mater Res.* 2023;26:2–7. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0555>
23. Sattar M, Othman AR, Muzamil M, Kamaruddin S, Akhtar M, Khan R. Correlation Analysis of Established Creep Failure Models through Computational Modelling for SS-304 Material. *Metals (Basel).* 2023;13(2). <https://doi.org/10.3390/met13020197>
24. Abdulsalam H. Mesh sensitivity assessment on 2D and 3D elastic finite element analysis on a compact tension specimen geometry using Abaqus/CAE software. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021;730(1):012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/730/1/012032>
25. Zhang J, Li J, Zan J, Guo Z, Liu K. A Creep Constitutive Model, Based on Deformation Mechanisms and Its Application to Creep Crack Growth. *Metals (Basel).* 2022;12(12):2179. <https://doi.org/10.3390/met12122179>
26. Soares TRL, Kieliba I, Azenha M, Tonnesen T,

- Lourenço PB. A theta projection model for compressive creep behaviour of refractories at high temperature. application to alumina-spinel. *Meccanica*. 2023;58(12):2401–20. <https://doi.org/10.1007/s11012-023-01734-6>
27. Kim WG, Yin SN, Kim YW, Chang JH. Creep characterization of a Ni-based Hastelloy-X alloy by using theta projection method. *Eng Fract Mech*. 2008;75(17):4985–95. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.06.017>
28. Ruban R, Latha S, Sivapirakasam SP, Srinivasan VS, Prasad Reddy G V. On new relation for theta projection approach for the prediction of creep behaviour of alloy D9I austenitic stainless steel. *Mater Today Proc*. 2019; 9154–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.417>
29. Law M, Payten W, Snowden K. Creep modeling of welded joints using the theta projection concept and finite element analysis. *J Press Vessel Technol*. 2000;122(1):22–6. <https://doi.org/10.1115/1.556141>
30. Smith SA. Microstructural evolution of Nimonic 263 for use in next generation power plant [PhD thesis]. Loughborough (UK): Loughborough University; 2014. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.am-epri-2010p0110>
31. Liu H, Peng F, Zhang Y, Li Y, An K, Yang Y, et al. A new modified theta projection model for creep property at high temperature. *J Mater Eng Perform*. 2020;29:4779–85. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04973-w>
32. Doyar I, Poshyvalov V. Development of a stochastic model of failure of structural materials in creep at hardening stage. *East Eur Adv Technol J*. 2016;3(5):25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.69653> (In Russian)
33. Hiyoshi N, Araya M. Creep deformation and rupture time evaluation for Ti43Al5V4Nb at 1033 K using the θ -projection method. *Mater High Temp*. 2021;38(1):31–8. <https://doi.org/10.1080/09603409.2020.1852650>