مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۸/ دوره ۹/ شماره ۲/ صفحه ۶۱-۷۶

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه صنعتی شاهرود

DOI: 10.22044/jsfm.2019.8101.2842

مدلسازی رفتار خزشی در آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم- مس- نیکل- منیزیم در دماها و سطوح تنشی مختلف

هانیه ارو[۱] و محمد آزادی[۲،*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

[۲] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

در این مقاله، رفتار خزشی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم- مس- نیکل- منیزیم که در ساخت قطعه پیستون در موتور خودرو کاربرد دارد، در دماها و تنش‌های مختلف، مدلسازی شد. برای این منظور، آزمون خزش روی نمونه‌های استاندارد ریخته‌گری شده، تحت نیروی کشش ثابت و دمای ثابت، اجرا گردید. دماها در آزمون خزش برابر با ۲۵۰، ۲۷۵ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و سطوح تنشی نیز، برابر با ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. تحلیل داده‌های تجربی نشان داد که در یک سطح تنش ثابت، با افزایش دما، کمینه نرخ کرنش خزشی، افزایش یافته و کرنش شکست خزشی، کاهش می‌یابد؛ اما در یک دمای ثابت، با افزایش سطوح تنشی، هر دو مقدار فوق، افزایش می‌یابد. براساس نتایج مدلسازی، قانون توانی وابسته به دما، با کمترین خطای نسبی و کوچکترین محدوده پراکندگی، بهترین مدل رفتار ماده بر پایه نرخ کرنش خزشی، معرفی گردید. مدل بیلی- نورتن نیز، در بین مدل‌های رفتار ماده بر پایه کرنش خزشی، نتایج بهتری را نشان داد.

کلمات کلیدی: مدلسازی؛ رفتار خزش؛ آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم؛ اثر دما؛ اثر سطح تنش.

Modeling of Creep Behavior in AlSiCuNiMg Alloy at Different Temperatures and Stress Levels

H. Aroo[1], M. Azadi[2,*]

[1] MS.c. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

[2] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

In this article, the creep behavior of the AlSiCuNiMg alloy, which has been widely utilized in the piston component of the vehicle engine, has been modelled at different temperatures and various stresse levels. For this objective, the creep test was done on casted standard specimens, under a constant temperature and a constant tensile loading condition. Temperatures in creep testing were considered as 250, 275 and 300°C and stress levels were 75, 100 and 125 MPa. Experimental data showed that at a constant stress level, by increasing the temperature, the minimum true strain rate increased and the final true strain decreased; however, at a constant temperature, by increasing the stress level, both mentioned values increased. Based on modeling results, the temperature-dependent power law was the superior strain rate-based model, with the lowest value for the relative error and the scatter-band. In addition, the Bailey-Norton model had better modeling results between strain-based models.

Keywords: Modeling; Creep Behavior; Aluminum-Silicon Alloy; Temperatures Effect; Stress Level Effect.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۰۲۱۰۷۲۸۰؛ فکس: ۳۳۳۲۱۰۰۵-۰۲۳

آدرس پست الکترونیک: m_azadi@seman.ac.ir

۱- مقدمه

مزیت‌هایی همچون قابلیت ریخته‌گری، چگالی پایین، مقاومت سایشی خوب و رفتار حرارتی مناسب، باعث شده تا آلیاژهای آلومینیوم، بطور عمده در صنعت موتور، خودرو و قطعات وابسته استفاده شوند. ضمنا نسبت استحکام به وزن مناسب این آلیاژهای آلومینیوم، دلیل دیگری به کاربرد زیاد آن‌ها در ساخت قطعات موتور است [۱-۳].

در این گونه قطعات تحت تاثیر بارگذاری‌های مختلف، بخصوص دردماهای زیاد، پدیده خزش مطرح می‌شود. معمولا دو عامل نیروی مکانیکی و دمای زیاد (بیشتر از ۴۰ درصد دمای ذوب ماده)، می‌تواند پدیده خزش را در یک سازه مکانیکی، مطرح سازد. این دو عامل در قطعاتی همچون سرسیلندر و پیستون موتور، به دلیل وجود نیروهای ترمومکانیکی ناشی از احتراق، دیده می‌شوند که باید توسط مهندسان طراح، مدنظر قرار گیرد. در این زمینه، خواص خزشی آلیاژهای آلومینیوم و مدلسازی رفتار مواد، مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه، به جزئیات برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

ایشیکاوا[1] و همکاران [۴]، آزمایش‌هایی برای بررسی رفتار خزش در آلومینیوم خالص تحت دماهای پایین انجام دادند. نتایج آن‌ها مشخص کرد که نرخ خزش به سطح تنش اعمال شده، بستگی دارد و تنش سیکلی روی عمر خزشی مواد، اثر دارد. این افزایش و کاهش تنش سیکلیک، زمان پارگی[2] را کاهش می‌دهد. جهرمی [۵]، رفتار خزشی آلیاژ آلومینیوم 7XXX ریخته‌گری اسپری[3] را مطالعه کرد. عملیات حرارتی روی نمونه‌های استاندارد خزش، در دمای ۴۸۰ درجه سانتی گراد و برای ۱ ساعت انجام شد. پس از پیرسازی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها در سطوح تنشی از ۲۰۰ تا ۳۶۰ مگاپاسکال و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، تحت آزمون خزش قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که نرخ خزش این آلیاژ، بسیار پایین‌تر از آلیاژ ۷۰۷۵ ریخته‌گری ماسه‌ای[4] است. ایشیکاوا و کوبایاشی[5] [۶]، مطالعه رفتار خزش و پارگی در آلیاژ آلومینیوم- منیزیم A5083 را انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که کمینه نرخ کرنش خزشی، به جای نرخ خزش حالت پایدار در ماده مشاهده شد. به عبارت دیگر، در مرحله دوم خزش، نرخ کرنش خزشی ثابت نبود. ضمنا کمینه نرخ کرنش خزشی وابسته به تنش و دمای اعمال شده بود؛ اما انرژی فعال شدن مستقل از تنش و دما بود. برای مدلسازی نیز، آن‌ها از رابطه مانکمن- گرانت[6] بین کمینه نرخ کرنش خزشی و عمر خزشی استفاده کردند. دوبز و میلیکا[7] [۷]، نتایج آزمون خزش روی دو محلول جامد آلومینیوم (Al-5.5wt%Mg و Al-13.7wt%Zn)، در دماهای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. در ادامه، آن‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف، خواص مواد و نرخ کرنش خزشی را تخمین زدند. ضمنا آن‌ها انرژی فعالسازی دو ماده را به ترتیب، در محدوده ۹۱ تا ۱۶۰ و ۱۱۷ تا ۱۳۱ کیلوژول بر مول، محاسبه کردند. سریواستاوا[8] و همکاران [۸]، رفتار خزش تنش پایین در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را مطالعه کردند. آزمون خزش در محدوده دمایی ۳۵۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد و در تنش کششی بین ۱/۸ تا ۶/۳ مگاپاسکال انجام شد. مقدار انرژی فعال‌سازی برای مدلسازی رفتار خزش ماده برابر با ۱۴۷ کیلوژول بر مول بود و شاخص تنش، در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، نزدیک به ۱ گزارش شد.

لین[9] و همکاران [۹]، گسیختگی خزش در آلیاژهای آلومینیوم و مس را مطالعه کردند. آزمون‌های خزش تحت کشش خالص، پیچش خالص و ترکیب کشش و پیچش، در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مس خالص و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای یک آلیاژ آلومینیوم انجام شد. مدلسازی بصورت چند محوره و براساس معادلات ذاتی آسیب خزش، ارائه گردید. نتایج تجربی نشان داد که شرایط تنش، تاثیر قابل توجهی در فرایند تغییر شکل خزش برای هر دو ماده دارد. رکیونا و دجیستر[10] [۱۰]، رفتار خزشی آلیاژ آلومینیوم AlSi12CuMgNi، بصورت تقویت نشده و با فیبر کوتاه تقویت شده را مطالعه کردند. برای حالت تقویت شده، از ۱۰، ۱۵ و

[1] Ishikava
[2] Rupture
[3] Spray-cast
[4] Ingot-cast
[5] Ishikava and Kobayashi
[6] Monkman-Grant
[7] Dobes and Milicka
[8] Srivastava
[9] Lin
[10] Requena and Degister

۲۰ درصد فیبرهای کوتاه آلومینا استفاده کردند و سپس نتایج آزمون‌های خزش، در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. هر سه ماده تقویت شده، مقاومت خزشی بیشتری را نسبت به ماده تقویت نشده، داشتند. کوتاو و دوناند[1] [۱۱]، رفتار خزش فوم‌های آلومینیومی را بررسی کردند. این مواد با چگالی ۱/۲ تا ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت تنش تک محوره فشاری ثابت در محدوده بین ۵ تا ۱۴ مگاپاسکال، قرار گرفتند. نتایج روش المان محدود، نشان از تطابق مناسب با نتایج آزمایش‌ها داشت. آن‌ها با استفاده از مدلسازی، شاخص تنش را برابر با ۱ و ۱۴، به ترتیب، برای تنش‌های کمتر و بیشتر از ۸ مگاپاسکال محاسبه کردند. دیالوجنت[2] و همکاران [۱۲]، خزش فوم آلومینیوم- منیزیم را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که وابستگی شدیدی بین نرخ خزش و چگالی وجود دارد؛ همچنین، نتایج مدل اندرو[3]، برای تخمین رفتار خزشی ماده، مناسب بود. جانگ[4] [۱۳]، نشان داد که مقاومت خزش با افزایش غلظت نیکل و کروم در آلیاژ آلومینیوم پیستون، به دلیل جلوگیری از تغییر شکل با افزایش ذرات رسوبی و یوتکتیک[5]، افزایش یافت.

لی[6] و همکاران [۱۴]، با استفاده از روش مکانیک آسیب پیوسته[7]، رفتار خزش آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۲۱۲۴، تحت تنش کششی ثابت را مدلسازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج پیش‌بینی شده وجود داشت. یوان[8] و همکاران [۱۵]، رفتار خزش آلیاژ منیزیم Mg-9Gd-1Y-0.5Zr با کاربرد در پیستون موتور، بررسی کردند. آزمون خزش در دماهای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و تنش‌های ۵۰ تا۱۲۰ مگاپاسکال انجام شد. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که مقاومت خزشی ماده، با افزایش دما و تنش، کاهش یافت. ضمنا آن‌ها، با استفاده از روابط اصلاح شده مونکمن- گرانت[9]، نرخ خزش پایدار و زمان شکست ماده را مدلسازی کردند. ماکسیمو[10] و همکاران [۱۶]، مدلسازی پدیده سخت‌شدگی کرنشی و رفتار خزشی آلیاژ آلومینیوم 2024T3 را انجام دادند. آن‌ها رفتار ماده را در دماهای ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، با قانون توانی شرح دادند. فرناندز- گوتیرز و رکوانا [11] [۱۷]، اثر عملیات حرارتی بر مقاومت خزشی آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم AlSi12CuMgNi را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که محلول‌سازی منجر به انحلال ترکیبات بین فلزی منیزیم و فاز یوتکتیک سیلیسیوم شد. این تغییرات ریزساختاری، مقاومت خزش ماده را با افزایش زمان محلول‌سازی در عملیات حرارتی، کاهش داد. اسپیگارلی و سنداستروم[12] [۱۸]، یک مدلسازی از رفتار خزشی را برای آلومینیوم ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نرخ خزش در تنش‌های زیاد و دماهای کم را می‌توان با تمرکز حفره‌ها، شرح داد. این مدل همچنین توانست برای طیف گسترده‌ای از تنش‌ها در قانون توانی خزش، با شاخص ۴ تا ۵ نیز صادق باشد.

از پیشینه تحقیق ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که مطالعه رفتار خزش در آلیاژهای آلومینیوم مختلف، بصورت گسترده‌ای انجام شده است. ضمنا اثر متغیرهای مختلف (تنش و دما) بر عمر خزش ماده و کمینه نرخ کرنش خزشی، توسط محققان مختلفی ارائه شده است. همچنین، با استفاده از مدلسازی‌های مختلفی، رفتار خزش ماده، توصیف گردیده است؛ اما به عنوان یک نوآوری، می‌توان ادعا نمود که تحقیقات روی رفتار خزش آلیاژ آلومینیوم پیستون، به ندرت یافت می‌شود. لذا در این مقاله، رفتار خزشی آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم، با استفاده از روش‌های مختلف (بر پایه تنش و بر پایه نرخ کرنش برای تخمین عمر خزش ماده و همچنین، بر پایه نرخ کرنش برای تخمین کمینه نرخ کرنش ماده)، مدلسازی شده است. برای این منظور، آزمون خزش روی نمونه استاندارد، در دماها و سطوح تنش مختلف، اجرا شد. نتایج این مقاله بصورت نمودارهای نرخ کرنش خزشی برحسب زمان، کرنش خزشی برحسب زمان و نرخ کرنش خزشی برحسب کرنش خزشی، در دو حالت نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی ارائه شده است.

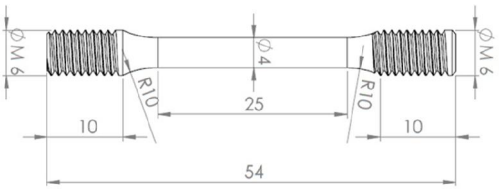
[1] Couteau and Dunand
[2] Diologent
[3] Andrews
[4] Jeong
[5] Eutectic and Precipitation Particles
[6] Li
[7] Continuum Damage Mechanics (CDM)
[8] Yuan
[9] Monkman-Grant
[10] Maximov
[11] Fernandez-Gutierrez and Requena
[12] Spigarelli and Sandstrom

۲- مواد و آزمون

همان گونه که ذکر شد، آلیاژهای آلومینیوم کاربرد وسیعی در ساخت قطعه پیستون موتورها دارد. براساس چنین کاربردی و اینکه در قطعه مدنظر تحت بارهای مکانیکی در دماهای زیاد است، ممکن است پدیده خزش رخ دهد؛ لذا ماده مورد مطالعه در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم با کاربرد در پیستون موتور است. طبق نتایج آزمون کوانتومتری[1]، درصد عناصر این ماده شامل ۱۲/۵ درصد سیلیسیوم، ۲/۴ درصد مس، ۲/۲ درصد نیکل، ۰/۷۴ درصد منیزیم، ۰/۴۱ درصد آهن و آلومینیوم عنصر پایه است.

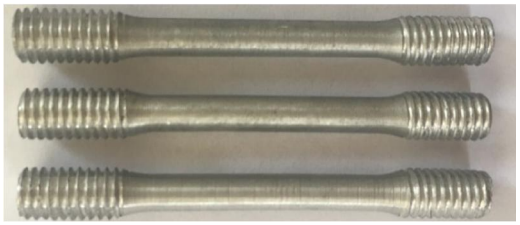
شایان ذکر است که روش ریخته‌گری ثقلی به عنوان فرایند تولید آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم، بصورت استوانه‌های اولیه، در قالب چدنی بود. سپس این نمونه‌های اولیه ماشینکاری شده و نمونه استاندارد آزمون خزش، استخراج گردید.

مطابق استاندارد ASTM-E139-11 [۱۹]، آزمون‌های خزش روی نمونه‌های استاندارد انجام شد. شرایط آزمون خزش در جدول ۱ آورده شده است. دمای آزمون، با توجه به بیشینه دما در قطعه پیستون موتور احتراقی (در حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) [۱۰و۱۷]، انتخاب شد. سطوح تنش نیز براساس مرجع [۱۳] انتخاب گردید. نقشه ابعادی نمونه استاندارد برای آزمون خزش و اندازه واقعی نمونه آزمون خزش به ترتیب، در شکل ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. آزمون‌های خزش، با دستگاه کشش مدل SCT-30 با ظرفیت اعمال نیروی ۳۰ تن و با تجهیزات کرنش‌سنج و کوره حرارتی، به ترتیب، به منظور اندازه‌گیری تغییرطول نمونه و اعمال دما، انجام شد. جزئیات بیشتر برای آزمون‌های خزش، در مرجع [۲۰] آمده است.



شکل ۱- نقشه ابعادی نمونه استاندارد آزمون خزش

[1] Quantometery



شکل ۲- اندازه واقعی نمونه استاندارد آزمون خزش

جدول ۱- شرایط دما و تنش در آزمون‌های خزش

تنش (MPa)	دما (°C)	آزمون	متغیر مورد بررسی
۱۰۰	۳۰۰	۱	
۱۰۰	۲۷۵	۲	دما
۱۰۰	۲۵۰	۳	
۱۲۵	۲۷۵	۴	
۱۰۰	۲۷۵	۵	تنش
۷۵	۲۷۵	۶*	

* تکرار آزمون شماره ۲

۳- مدلسازی

در این بخش مدل‌های خزش ذکر می‌شود که در مراجع [۲۱-۳۳] ارائه شده است. مدل‌های خزش برای پیش‌بینی آسیب و عمر خزشی به سه نوع رابطه، تقسیم می‌شوند [۳۴]:

الف) مدل‌های رفتار مواد براساس تنش: شامل روابط تنش- عمر (و در برخی موارد شامل روابط تنش- عمر- دما)

ب) مدل‌های رفتار مواد براساس کرنش خزشی یا نرخ کرنش خزشی: شامل روابط تنش- کرنش خزشی یا روابط تنش- کمینه نرخ کرنش خزشی (و در برخی موارد روابط تنش- کرنش خزشی- دما یا روابط تنش- کمینه نرخ کرنش خزشی- دما)

ج) مدل‌های رفتار مواد براساس روش مکانیک آسیب پیوسته یا مدل رابتنو- کاچنو[1]

مدل‌های رفتار مواد بر پایه تنش، برای تخمین عمر خزشی، شامل موارد زیر می‌باشد [۳۴]:

- رابطه مانسون- برون[2]:

$$t_{cr} = 10^{[P_{MB}(T-C_2)^n + log(C_1)]} \quad (۱)$$

- رابطه مانسون- هافرد[3]:

$$t_{cr} = 10^{[P_{MH}(T-C_2) + log(C_1)]} \quad (۲)$$

- رابطه شربی- دورن[4]:

$$t_{cr} = \frac{P_{SD}}{exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (۳)$$

در این پژوهش، مقدار انرژی فعال‌سازی (Q) ماده برابر با ۱۴۲ (kJ/mol) لحاظ شده است [۳۵].

- رابطه اور- شربی- دورن[5]:

$$t_{cr} = 10^{\left[P_{OSD} + \frac{C}{T}\right]} \quad (۴)$$

- رابطه لارسون- میلر[6]:

$$t_{cr} = 10^{\left[\frac{P_{LM}}{T} - C\right]} \quad (۵)$$

- مدل ساده[7]:

$$t_{cr} = (P_{SM})^{\frac{1}{m}} \quad (۶)$$

مدل‌های رفتار ماده بر پایه نرخ کرنش خزشی، برای تخمین عمر خزشی، شامل موارد زیر است [۳۴]:

- رابطه مانکمن- گرانت[8]:

$$t_{cr} = \frac{C}{(\dot{\varepsilon}_{min})^n} \quad (۷)$$

- رابطه دوبز- میلیکا[9]:

$$t_{cr} = \frac{C\varepsilon_R}{(\dot{\varepsilon}_{min})^n} \quad (۸)$$

- قانون توانی وابسته به دما[10]:

$$t_{cr} = \left[\frac{\dot{\varepsilon}_{min}}{C\ \sigma^n\ exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)}\right]^{\frac{1}{m}} \quad (۹)$$

- قانون توانی مستقل از دما[11]:

$$t_{cr} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{min}}{C\ \sigma^n}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (۱۰)$$

مدل‌های رفتار ماده بر پایه نرخ کرنش خزشی، برای تخمین کمینه نرخ کرنش خزشی، شامل موارد زی٠+ر می‌باشد [۳۴]:

- قانون آرهنیوس[12]:

$$\dot{\varepsilon}_{min} = C\ exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (۱۱)$$

- قانون توانی ساده[13]:

$$\dot{\varepsilon}_{min} = C\ \sigma^n \quad (۱۲)$$

- قانون توانی نورتن[14]:

$$\dot{\varepsilon}_{min} = C\ \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (۱۳)$$

- قانون سینوسی هذلولی[15]:

$$\dot{\varepsilon}_{min} = C\ sinh(\bar{C}\sigma) \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (۱۴)$$

مدل‌های بر پایه کرنش خزشی برای تخمین کرنش خزشی در طول زمان، شامل موارد زیر است [۳۴]:

- قانون بیلی- نورتن[16]:

$$\varepsilon_c = C\ \sigma^n\ (t)^m \quad (۱۵)$$

- قانون فیندلی اصلاح شده توسط هدید[17] و همکاران:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + C\ \sigma^n\ (t)^m \quad (۱۶)$$

- قانون دیو و همکاران[18]:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma}{C_1} + \frac{\sigma}{C_2}\left[1 - exp\left(-\frac{C_2}{\overline{C_2}}t\right)\right] + \frac{\sigma}{\overline{C_1}}t \quad (۱۷)$$

مدل بر پایه کرنش خزشی برای تخمین نرخ کرنش خزشی شامل مورد زیر است [۳۴]:

- مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس[19]:

$$\dot{\varepsilon} = (C\ \sigma^n\ [(m+1)\varepsilon_c]^m)^{\frac{1}{m+1}} \quad (۱۸)$$

شایان ذکر است که مدل‌های ذکر شده (بر پایه کرنش خزشی برای تخمین کرنش خزشی در طول زمان)، رفتار

[1] Rabotnov-Kachanov
[2] Monson-Brown (MB)
[3] Monson-Haferd (MH)
[4] Sherby-Dorn (SD)
[5] Orr-Sherby-Dorn (OSD)
[6] Larson-Miller (LM)
[7] Simple Model (SM)
[8] Monkman-Grant (MG)
[9] Dobes-Milicka (DM)
[10] Temperature-Dependent Power Law (TD-PL)
[11] Temperature-Independent Power Law (TI-PL)
[12] Arrhenius Law (AL)
[13] Simple Power Law (SPL)
[14] Norton Power Law (NPL)
[15] hyperbolic-sine Law (HSL)
[16] Bailey-Norton (BN)
[17] Findley Law Modified by Hadid (FH)
[18] Du (DU)
[19] ABAQUS Software (AS)

خزشی ماده را در یک دمای ثابت و سطوح تنشی مختلف، تخمین می‌زنند؛ لذا این مدل‌ها، برای تخمین رفتار خزشی ماده در دماهای مختلف، مناسب نمی‌باشند. به منظور یافتن ثابت‌های مواد در مدل‌های مختلف ارائه شده، نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی کالیبره شده‌اند تا خطاهای نسبی بین مقادیر تجربی و تخمین زده شده، کمینه شود. این خطاها برای ارزیابی صحت هرکدام از این مدل‌های رفتار مواد، براساس مقادیر تجربی کرنش خزشی، عمر خزشی و کمینه نرخ کرنش خزشی ($\dot{\varepsilon}_{min,exp}, t_{cr,exp}, \varepsilon_{c,exp}$) و ، مقادیر محاسبه شده کرنش خزشی، عمر خزشی و کمینه نرخ کرنش خزشی ($\dot{\varepsilon}_{min,cal}, t_{cr,cal}, \varepsilon_{c,cal}$) است.

خطاهای نسبی مذکور (E_1، E_2 و E_3)، مطابق روابط (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) گزارش شده‌اند [۳۴].

$$E_1(\%) = \left|\frac{t_{cr,exp} - t_{cr,cal}}{t_{cr,exp}}\right| \times 100 \qquad (۱۹)$$

$$E_2(\%) = \left|\frac{\dot{\varepsilon}_{min,exp} - \dot{\varepsilon}_{min,cal}}{\dot{\varepsilon}_{min,exp}}\right| \times 100 \qquad (۲۰)$$

$$E_3(\%) = \left|\frac{\varepsilon_{c,exp} - \varepsilon_{c,cal}}{\varepsilon_{c,exp}}\right| \times 100 \qquad (۲۱)$$

۴- نتایج و بحث

براساس داده‌های تجربی مستخرج از آزمون‌های خزش، منحنی کرنش خزشی بر حسب زمان و منحنی نرخ کرنش خزشی بر حسب زمان، در دمای ثابت ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد (به منظور بررسی اثر تنش) و در تنش ثابت ۱۰۰ مگاپاسکال (به منظور بررسی اثر دما)، به ترتیب، در شکل‌های ۳ تا ۶ ترسیم شده است. شایان ذکر است که کرنش در این مقاله، بصورت مقادیر حقیقی (و نه مقادیر مهندسی) محاسبه و لحاظ شده‌اند. طبق شکل ۳، همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش تنش (در دمای ثابت ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد)، عمر خزش در ماده کاهش می‌یابد و لذا تنش، اثر کاهنده دارند. براساس شکل ۵، با افزایش دما (در تنش ثابت ۱۰۰ مگاپاسکال) نیز، عمر خزش در ماده کاهش می‌یابد؛ لذا دما، مطابق انتظار قبلی، همچون تنش، اثر کاهنده دارند؛ چراکه بطور کلی با افزایش دما، استحکام ماده کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل‌های ۴ و ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش هر دو متغیر دما و تنش، کمینه نرخ کرنش خزشی، افزایش می‌یابد. مقادیر دقیق برای عمر خزشی، کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش شکست خزشی، در جدول ۲ آمده است.

دقت شود که مطابق شکل‌های ۴ و ۶، نرخ کرنش خزشی، در مرحله دوم نمودار، مقدار ثابتی نیست و دارای یک مقدار کمینه است. چنین رفتاری نیز در برخی از مراجع [۳۴،۳۶،۶،۱۷]، آمده است. آبه[1] [۳۶] متذکر می‌شود که در برخی از مواد، ناحیه دوم خزش حذف می‌شود و عملا ناحیه پایدار وجود ندارد.

همان‌گونه که ذکر شد، براساس نتایج جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش دما، در سطح تنش ثابت، کمینه نرخ کرنش خزشی افزایش می‌یابد؛ اما کرنش شکست خزشی کاهش می‌یابد. علت افزایش نرخ کرنش خزشی، کاهش عمر خزشی در دماهای بیشتر است. این مطلب در مرجع [۶] نیز، گزارش شده است. در مقابل، با افزایش سطح تنش، در دمای ثابت، کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش شکست خزشی افزایش می‌یابند. همانند نتیجه بدست آمده در این پژوهش، ایشیکاوا و کوباياشی [۶]، گزارش دادند که با افزایش سطح تنش، کمینه نرخ کرنش خزشی، افزایش می‌یابد.

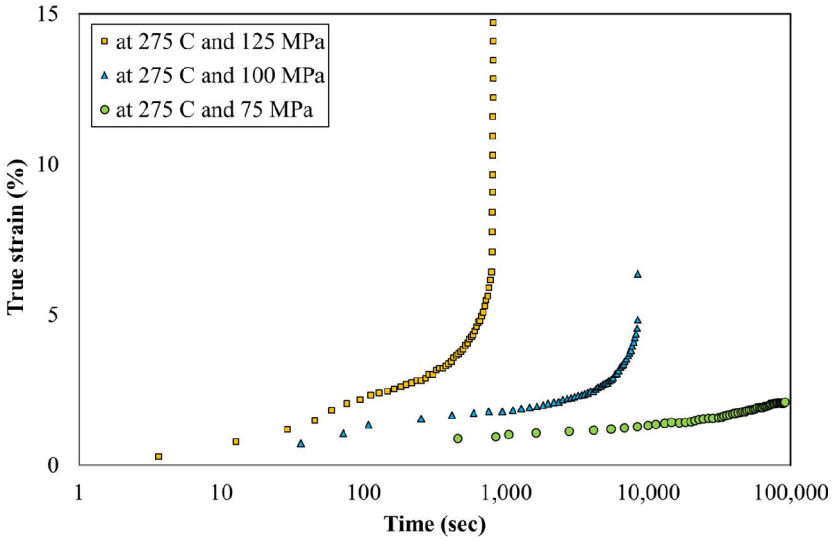
برای درک بهتر نتایج بدست آمده، در صورتی که کمترین سطح تنش (۷۵ مگاپاسکال) و کمترین دما (۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) مبنای مقایسه قرار داده شود، می‌توان بیان نمود که با افزایش ۱۰ درصدی دما در تنش ثابت ۱۰۰ مگاپاسکال، عمر خزشی، کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش خزشی در ماده، به ترتیب، ۳۸، ۹ و ۲۵ درصد تغییرات داشته‌اند. اگر این افزایش دما به میزان ۲۰ درصد باشد، این مقادیر به ترتیب، به اعداد ۹۹، ۱۰۲۵۹ و ۲۹ درصد تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، رابطه بین تغییرات دما و تغییرات عمر خزشی، خطی و رابطه بین تغییرات دما و تغییرات کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش خزشی در ماده، غیرخطی است.

این در حالی است که اگر دما ثابت فرض شود (۲۷۵ درجه سانتی‌گراد)، با تغییر ۳۳ درصدی تنش، عمر خزشی، کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش خزشی در ماده، به ترتیب، ۹۱، ۲۴۰۰ و ۲۰۵ درصد تغییرات داشته‌اند. با تغییر ۶۷

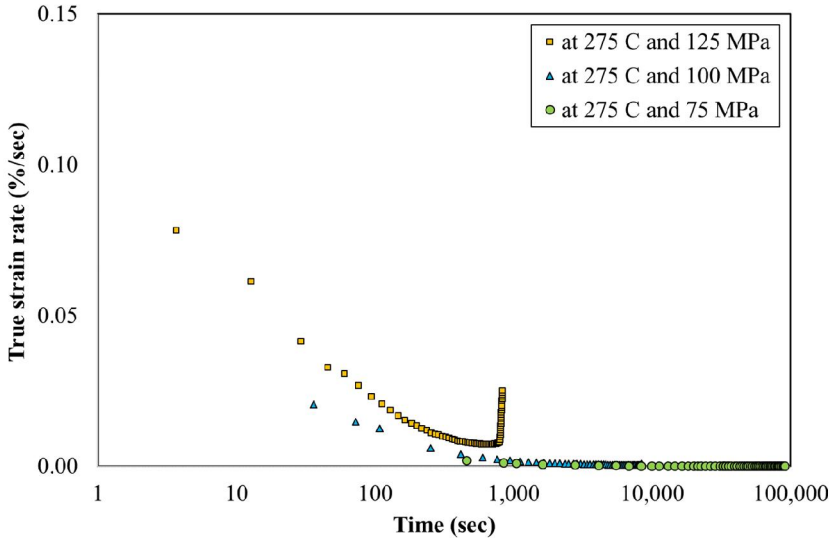
[1] Abe

درصدی تنش، این مقادیر برابر با ۹۹، ۳۶۴۵۰ و ۸۹۵ درصد خواهند شد. همانند نتایج تغییرات دما، می‌توان نتیجه گرفت که یک رابطه غیرخطی بین دما و عمر خزشی، کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش خزشی در ماده، وجود دارد. در مرجع [۴]، گزارش شده است که با تغییر ۱۴ درصدی در تنش، عمر خزش آلومینیوم، به میزان ۱۲ درصد تغییر می‌کند.

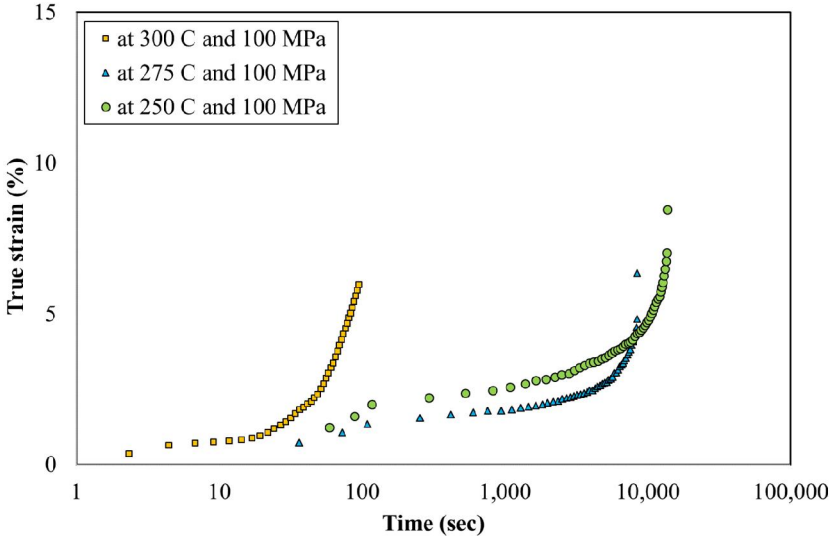
لی و همکاران [۱۴]، نشان دادند که رفتار خزش آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۲۱۲۴، به شدت، به دما و تنش وابسته است؛ همچنین با افزایش تنش، کرنش خزشی ماده افزایش و عمر خزش ماده کاهش یافت. این نتایج، مطابقت خوبی با نتایج بدست آمده در این تحقیق دارد.



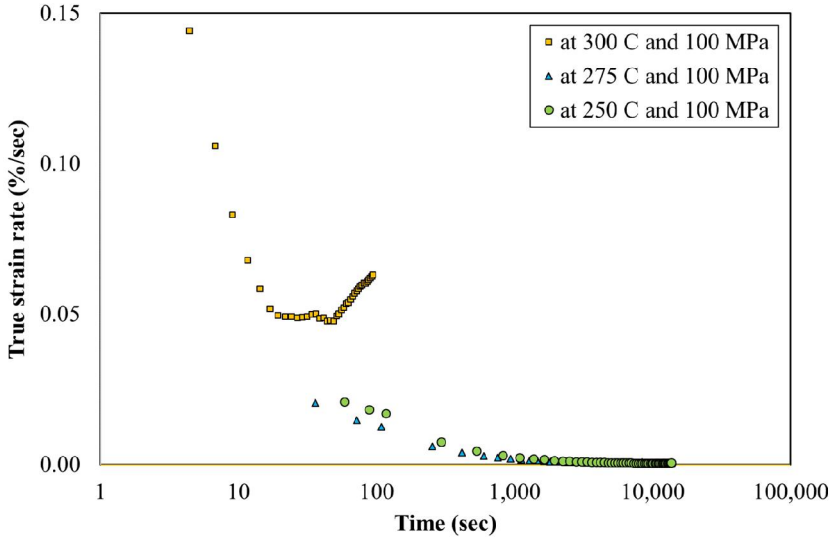
شکل ۳- منحنی کرنش خزشی بر حسب زمان در دمای ثابت ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد براساس داده‌های تجربی



شکل ۴- منحنی نرخ کرنش خزشی بر حسب زمان در دمای ثابت ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد براساس داده‌های تجربی



شکل ۵- منحنی کرنش خزشی بر حسب زمان در تنش ثابت ۱۰۰ مگاپاسکال براساس داده‌های تجربی



شکل ۶- منحنی نرخ کرنش خزشی بر حسب زمان در تنش ثابت ۱۰۰ مگاپاسکال براساس داده‌های تجربی

نتایج مدلسازی عمر خزشی ماده و خطای نسبی آن، با استفاده از روش‌های مختلف مانکمن- گرانت (MG)، دوبز- میلیکا (DM)، قانون توانی وابسته به دما (TD-PL) و قانون توانی مستقل از دما (TI-PL) در جدول ۳ آمده است. به ترتیب، میانگین خطای نسبی برابر با ۳۶/۴۶، ۷۱/۷۸، ۲۱/۲۳ و ۷۹/۲۸ درصد است؛ لذا بهترین مدل، قانون توانی وابسته به دما است. رتبه دوم از لحاظ میانگین خطای نسبی در این پژوهش، مربوط به مدل مانکمن- گرانت است.

شایان ذکر است که در مرجع [۳۴]، مدل مانکمن- گرانت، کمترین خطا را برای مدلسازی رفتار خزشی در یک نوع سوپرآلیاژ داشته است. بیشینه خطای نسبی نیز، به ترتیب، ۵۶/۵۶، ۹۹/۹۶، ۵۱/۴۶ و ۹۹/۹۹ برای مدل‌های

جدول ۲- داده‌های تجربی آزمون‌های خزش

کرنش شکست خزشی (%)	کمینه نرخ کرنش خزشی (%/sec)	عمر خزشی (sec)	تنش (MPa)	دما (°C)
۶/۰	۰/۰۴۷۶۵	۹۴/۸	۱۰۰	۳۰۰
۶/۴	۰/۰۰۰۵۰	۸۴۰۶/۸	۱۰۰*	۲۷۵*
۸/۵	۰/۰۰۰۴۶	۱۳۶۳۵/۹	۱۰۰	۲۵۰
۲۰/۹	۰/۰۰۷۳۱	۸۳۱/۳	۱۲۵	۲۷۵
۶/۴	۰/۰۰۰۵۰	۸۴۰۶/۸	۱۰۰*	۲۷۵*
۲/۱	۰/۰۰۰۰۲	۹۰۹۹۷/۲	۷۵	۲۷۵

*هر دو ردیف شامل نتایج یک آزمون هستند.

مانکمن- گرانت، دوبز- میلیکا، قانون توانی وابسته به دما و قانون توانی مستقل از دما است که نتیجه قبلی (مربوط به میانگین خطای نسبی) را تصدیق می‌کند. در انتهای این بخش، ثوابت ماده مدل‌های مختلف بر پایه نرخ کرنش خزشی (ذکر شده در جدول ۳)، ارائه شده است.

در شکل ۷، محدوده پراکندگی برای عمر تجربی و عمر تخمینی با مدل‌های مختلف مانکمن- گرانت (MG)، دوبز- میلیکا (DM)، قانون توانی وابسته به دما (TD-PL) و قانون توانی مستقل از دما (TI-PL)، نمایش داده شده است. بر این اساس، کوچکترین محدوده پراکندگی، مربوط به قانون توانی مستقل از دما می‌باشد که داده‌های آن، در محدوده کمتر از 2X قرار گرفته‌اند. ضمنا دو مدل مانکمن- گرانت و مدل دوبز- میلیکا، از پراکندگی مناسبی برخوردار نیستند.

براساس نتایج مدلسازی توسط مدل‌های بیلی- نورتن (BN)، فیندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران (FH) و مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس (AS)، برای آزمون‌های انجام شده در دمای ثابت ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار میانگین خطای نسبی برای مدل بیلی- نورتن، ۲۱/۳۰ درصد، مدل فیندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران، ۲۶/۶۸ درصد و برای مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس ۷/۰۸ درصد است. قابل توجه است که این مدل‌ها، برای دمای متغیر قابل استفاده نیستند، چراکه دما در روابط آن‌ها وجود ندارد؛ همچنین، بیشینه خطای نسبی برای این مدل‌ها به ترتیب، ۱۸۹/۲۲، ۸۹/۸۱ و ۵۰/۵۱ درصد است.

جدول ۳- نتایج مدلسازی عمر خزشی ماده

خطای نسبی (٪)	عمر تخمینی (sec)	عمر تجربی (sec)	دما (°C)	تنش (MPa)
مانکمن- گرانت (MG)				
۵۶/۵۶	۱۴۸/۴	۹۴/۸	۳۰۰	۱۰۰
۳۲/۳۷	۵۶۸۵/۵	۸۴۰۶/۸	۲۷۵	۱۰۰
۵۵/۴۳	۶۰۷۷/۷	۱۳۶۳۵/۹	۲۵۰	۱۰۰
۲۰/۰۱	۶۶۵/۰	۸۳۱/۳	۲۷۵	۱۲۵
۱۷/۹۵	۷۴۶۶۵/۴	۹۰۹۹۷/۲	۲۷۵	۷۵
دوبز- میلیکا (DM)				
۱/۵۷	۹۶/۳	۹۴/۸	۳۰۰	۱۰۰
۹۸/۷۷	۱۰۳/۲	۸۴۰۶/۸	۲۷۵	۱۰۰
۹۸/۹۹	۱۳۷/۰	۱۳۶۳۵/۹	۲۵۰	۱۰۰
۵۹/۵۸	۳۳۶/۰	۸۳۱/۳	۲۷۵	۱۲۵
۹۹/۹۶	۳۴/۰	۹۰۹۹۷/۲	۲۷۵	۷۵
قانون توانی وابسته به دما (TD-PL)				
۲/۹۴	۹۲/۰	۹۴/۸	۳۰۰	۱۰۰
۳/۰۷	۸۱۴۹/۰	۸۴۰۶/۸	۲۷۵	۱۰۰
۳/۲۱	۱۳۱۹۷/۹	۱۳۶۳۵/۹	۲۵۰	۱۰۰
۵۱/۴۶	۱۲۵۹/۱	۸۳۱/۳	۲۷۵	۱۲۵
۴۵/۴۸	۴۹۶۱۵/۷	۹۰۹۹۷/۲	۲۷۵	۷۵
قانون توانی مستقل از دما (TI-PL)				
۲/۳۱	۹۲/۶	۹۴/۸	۳۰۰	۱۰۰
۹۹/۷۶	۲۰/۳	۸۴۰۶/۸	۲۷۵	۱۰۰
۹۹/۸۶	۱۹/۸	۱۳۶۳۵/۹	۲۵۰	۱۰۰
۹۴/۴۶	۰/۴۶	۸۳۱/۳	۲۷۵	۱۲۵
۹۹/۹۹	۷/۶	۹۰۹۹۷/۲	۲۷۵	۷۵

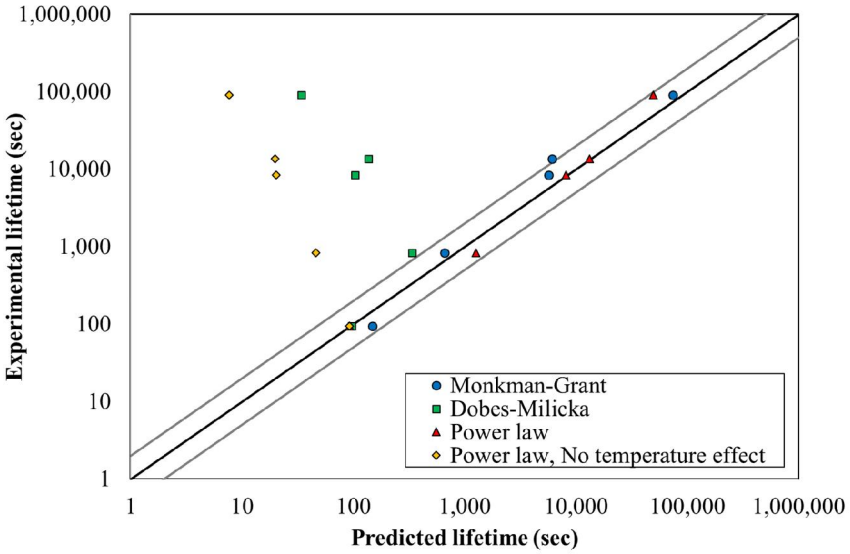
نتایج مدلسازی توسط مدل‌های بیلی- نورتن، فیندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران و مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس، به ترتیب، در شکل‌های ۸ و ۹ (شامل کرنش خزشی برحسب زمان و نرخ کرنش خزشی برحسب زمان) و شکل ۱۰ (شامل نرخ کرنش خزشی برحسب کرنش خزشی) آمده است.

بهترین مدل بین مدل‌های بر پایه کرنش خزشی برای تخمین کرنش خزشی در طول زمان، شامل مدل بیلی- نورتن است؛ چراکه میانگین خطای نسبی این مدل نسبت به مدل فایندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران، کمتر است و ترند نموداری آن (تغییرات کرنش خزشی در طول زمان و تغییرات نرخ کرنش خزشی در طول زمان) مناسب‌تری را مطابق شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهد؛ اما در عین حال، بیشینه خطای نسبی مدل بیلی- نورتن از مدل فایندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران، بیشتر است. در شکل ۱۰، یک بار منحنی نرخ کرنش خزشی تخمینی بر حسب کرنش خزشی تخمینی ترسیم شده است و یک بار دیگر نیز، منحنی نرخ کرنش حقیقی تخمینی بر حسب کرنش خزشی تجربی رسم گردیده است.

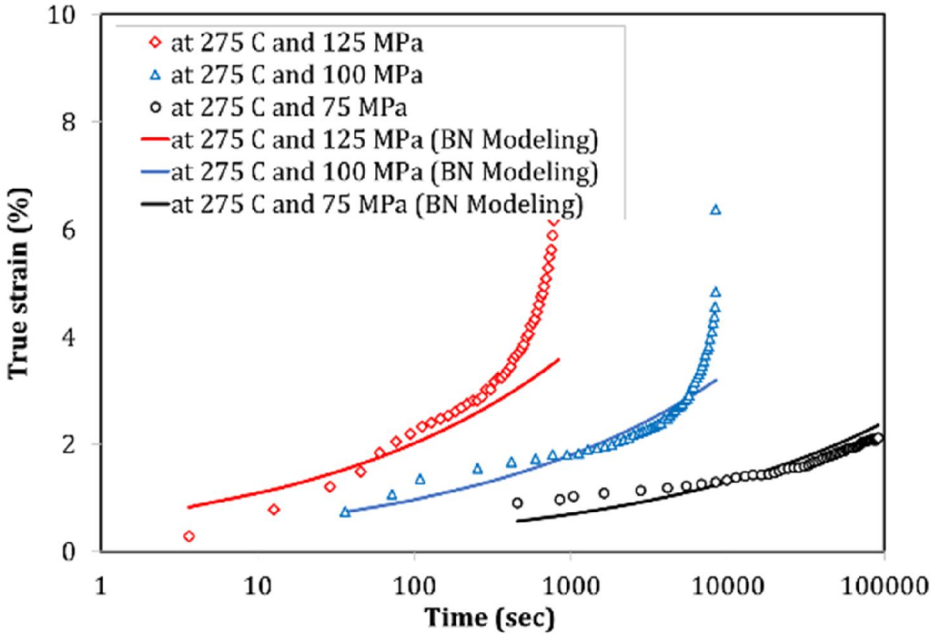
ضمنا کلیه مدل‌های رفتار ماده بر پایه تنش، برای تخمین عمر خزشی و کلیه مدل‌های رفتار ماده بر پایه نرخ کرنش خزشی، برای تخمین کمینه نرخ کرنش خزشی و در نهایت، مدل دیو و همکاران (DU) که یک نوع مدل بر پایه کرنش خزشی برای تخمین کرنش خزشی در طول زمان است، به ترتیب، قابلیت پیش‌بینی عمر خزشی، کرنش خزشی و نرخ کرنش خزشی را نداشتند.

شایان ذکر است که عدم قابلیت تخمین نرخ کرنش خزشی در یک نوع سوپرآلیاژ، با استفاده از مدل دیو و همکاران (DU)، در مرجع [۳۴] نیز، گزارش شده است که مطابقت مناسبی با نتایج این تحقیق دارد.

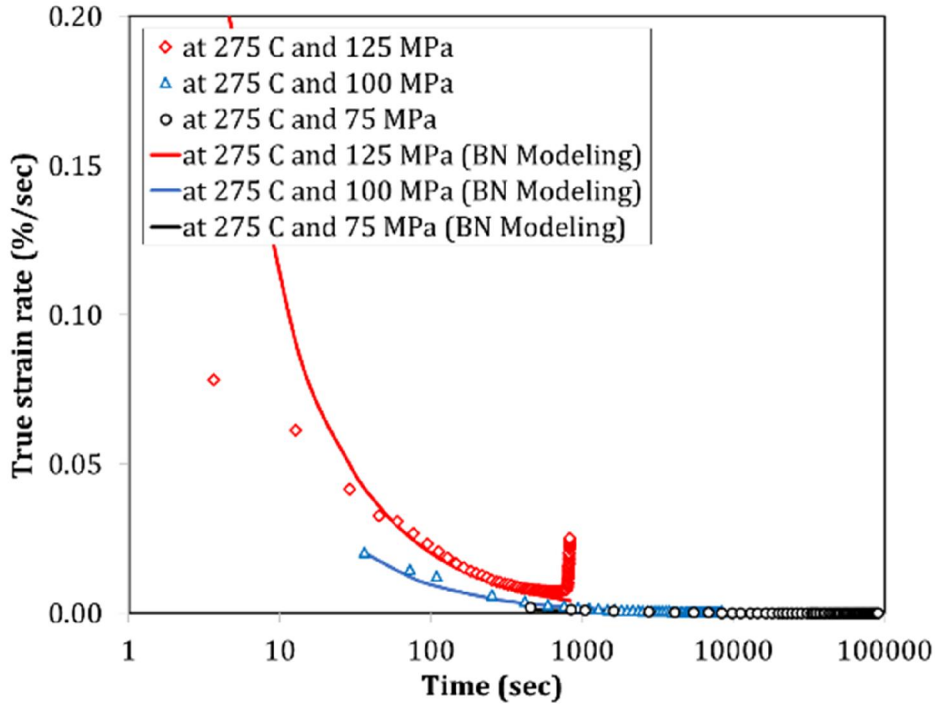
در جدول ۴، ثوابت ماده برای مدل‌های مختلف بر پایه نرخ کرنش خزشی (ذکر شده در جدول ۳) و همچنین، مدل-های رفتاری ماده شامل بیلی- نورتن، فیندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران و مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس ارائه شده است.



شکل ۷- محدوده پراکندگی عمر تجربی و عمر تخمینی

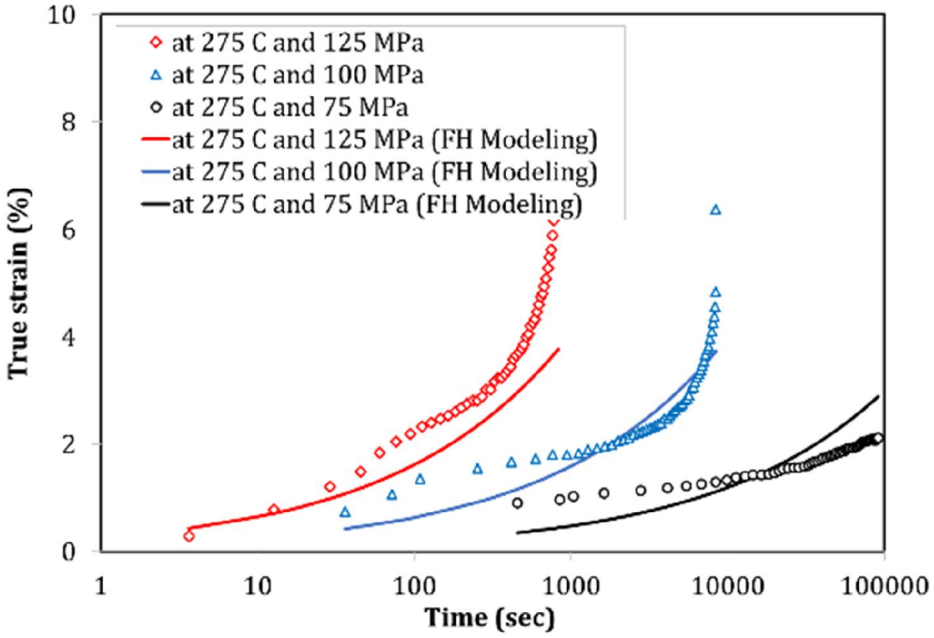


(الف)

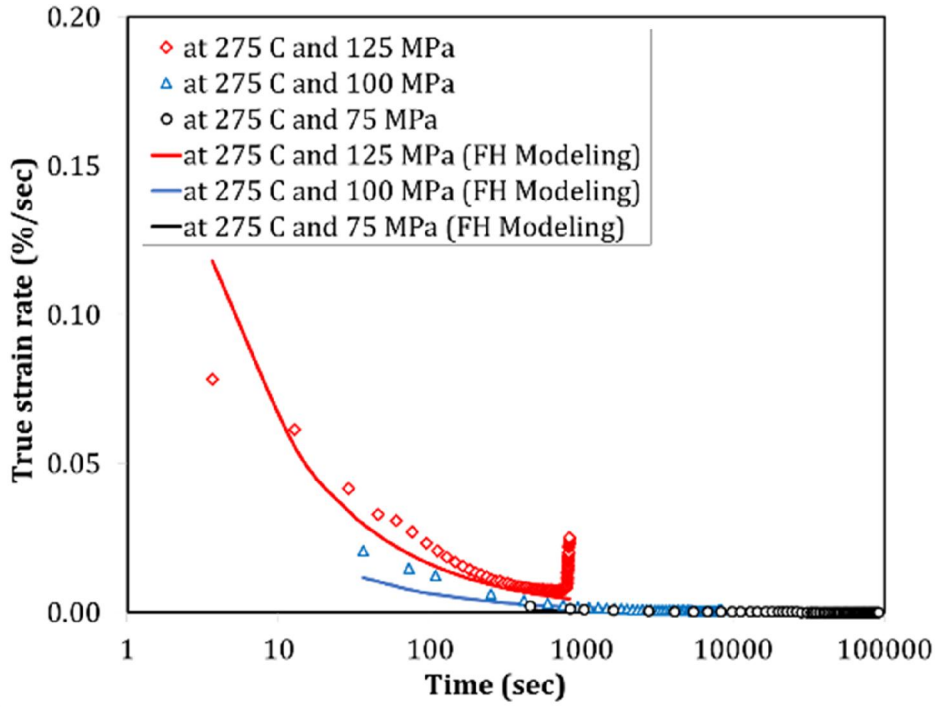


(ب)

شکل ۸- نتایج تجربی و تخمین زده شده مدل بیلی- نورتن:
الف) منحنی کرنش خزشی بر حسب زمان و ب) نمودار نرخ کرنش خزشی بر حسب زمان

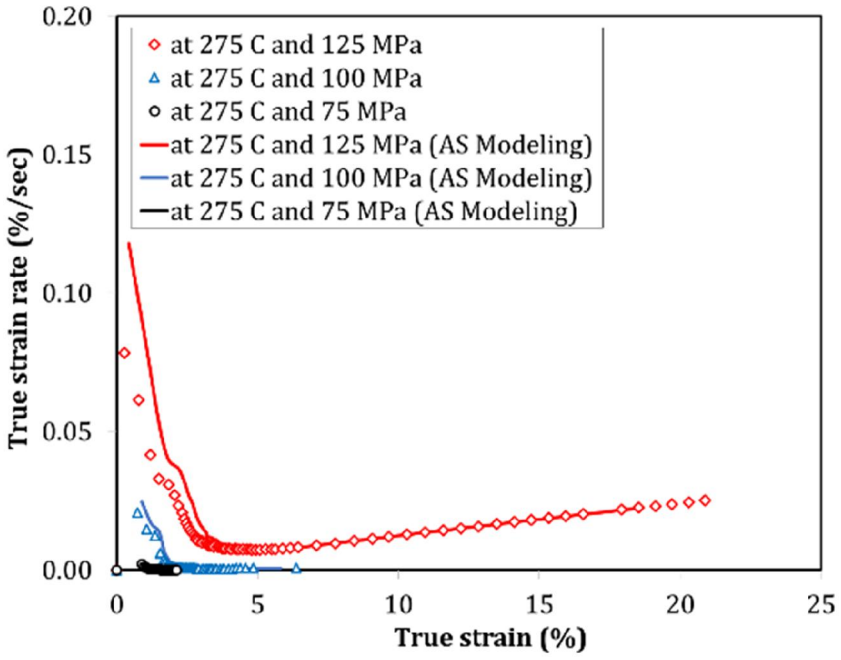


(الف)

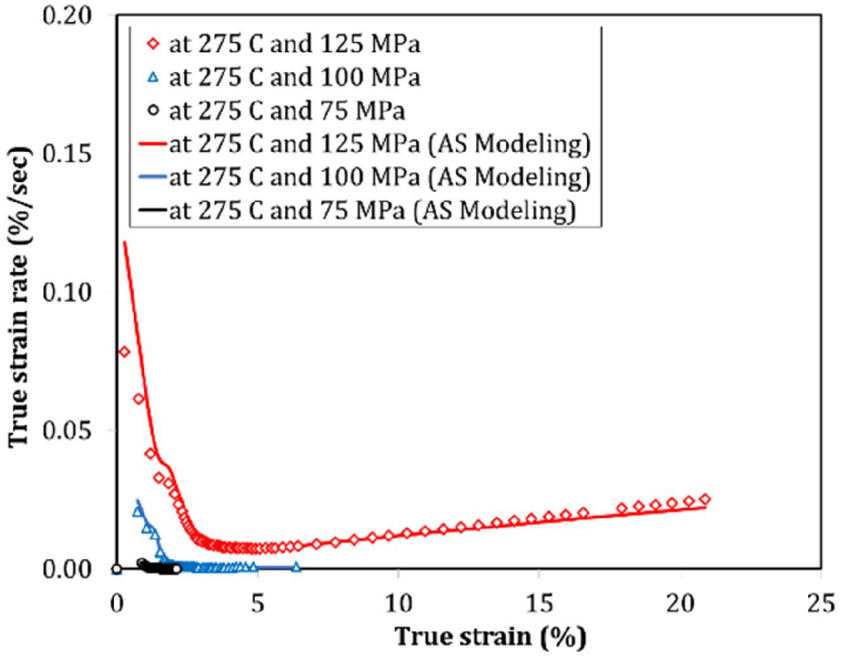


(ب)

شکل ۹- نتایج تجربی و تخمین زده شده مدل فایندلی اصلاح شده توسط هدید و همکاران:
الف) منحنی کرنش خزشی بر حسب زمان و ب) نمودار نرخ کرنش خزشی بر حسب زمان



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- نتایج تجربی و تخمین زده شده توسط مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس برای نرخ کرنش خزشی بر حسب کرنش خزشی: (الف) منحنی نرخ کرنش خزشی تخمینی بر حسب کرنش خزشی تخمینی و ب) منحنی نرخ کرنش خزشی تخمینی بر حسب کرنش خزشی تجربی

جدول ۴- ثوابت ماده در مدل‌های بر پایه نرخ کرنش خزشی

نام مدل	C	n	m
مانکمن- گرانت	۱۳	۰/۸۰۰	-
دوبز- میلیکا	۱۶	۰/۰۰۱	-
قانون توانی وابسته به دما	۱×۱۰^{-۴}	۲/۰۰۰	۱/۰۰۰
قانون توانی مستقل از دما	۶×۱۰^{-۱۰}	۱/۰۰۰	۳/۰۰۰
مدل بیلی- نورتن	۷×۱۰^{-۸}	۳/۳۰۰	۰/۲۷۰
مدل فیندلی اصلاح شده	۴×۱۰^{-۱۰}	۴/۲۰۰	۰/۴۰۰
مدل مورد استفاده در نرم‌افزار اباکوس	۳×۱۰^{-۱۴}	۳/۸۸۰	۶/۹۵۰

در ادامه پژوهش فوق پیشنهاد می‌شود که از روش مکانیک آسیب پیوسته برای تخمین آسیب در طول زمان نیز، استفاده شود و نتایج عمر خزش تخمینی با عمر خزش تجربی مقایسه گردد. همچنین، با بررسی تکرارپذیری آزمون خزش، می‌تواند دقت مدلسازی را افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خزشی در آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم- مس- نیکل- منیزیم، مدلسازی شد. لذا آزمون‌های خزش در دماها و سطوح تنشی مختلف نیز انجام گردید. مطابق با آزمون‌های خزشی، نتایج تجربی زیر حاصل گردید:

- طبق انتظار قبلی، با افزایش تنش و افزایش دما، عمر خزشی آلیاژ آلومینیوم کاهش می‌یابد.
- کمینه نرخ کرنش خزشی، با افزایش دما، در یک سطح تنش ثابت، افزایش می‌یابد و در عین حال، کرنش شکست خزشی کاهش می‌یابد.
- کمینه نرخ کرنش خزشی و کرنش شکست خزشی، با افزایش سطح تنش، در یک دمای ثابت، افزایش می‌یابند.

براساس فرایند مدلسازی انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:

- در مدل‌های رفتار ماده بر پایه نرخ کرنش خزشی، برای تخمین عمر خزشی، بهترین مدل، قانون توانی وابسته به دما است؛ چراکه کمترین مقدار میانگین و بیشینه خطای نسبی را دارا بود. ضمنا این مدل، کمترین محدوده پراکندگی (نمودار عمر تخمینی و عمر تجربی) را داشت.
- در مدل‌های رفتار ماده بر پایه کرنش خزشی برای تخمین کرنش خزشی در طول زمان، در دمای ثابت ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، بهترین نتیجه را مدل بیلی- نورتن داشت. البته مشکل این گونه مدل‌ها، به دلیل لحاظ ننمودن دما در رابطه آن‌ها، عدم تخمین کرنش خزشی در دماهای مختلف است.
- برخی از مدل‌ها شامل مدل‌های رفتار ماده بر پایه تنش، برای تخمین عمر خزشی و مدل‌های رفتار ماده بر پایه نرخ کرنش خزشی، برای تخمین کمینه نرخ کرنش خزشی و مدل دیو و همکاران از مدل‌های بر پایه کرنش برای تخمین کرنش خزشی در طول زمان، توانایی مدلسازی رفتار خزشی آلیاژ آلومینیوم را نداشتند.

در انتها، به این نکته دقت شود که در این مقاله، مدلسازی رفتار خزشی ماده براساس ۵ آزمون خزش روی نمونه‌های استاندارد، صورت گرفته است. لذا برای ارتقای فرایند مدلسازی و بهبود دقت و کاهش خطاهای مدل‌های رفتاری ماده، لازم است که تعداد آزمون‌های خزش بیشتری روی نمونه‌های استاندارد، اجرا شده و تکرارپذیری آنها، بررسی شود.

۶- فهرست علائم

t_{cr}	عمر خزشی، sec
T	دما، $^{\circ}$K
P_{MB}	پارامتر مانسون- برون
$\overline{C_1}, \overline{C_2}, C_1, C_2$	ثوابت ماده
$n, m, \bar{C}, C$	ثوابت ماده
P_{MH}	پارامتر مانسون- هافرد

P_{SD}	پارامتر شربی- دورن
Q	انرژی فعال‌سازی
R	ثابت جهانی گازها
P_{OSD}	پارامتر اور- شربی- دورن
P_{LM}	پارامتر لارسون- میلر
P_{SM}	پارامتر مدل ساده
σ	تنش اعمال شده، MPa
ε_c	کرنش خزشی
$\dot{\varepsilon}_{min}$	کمینه نرخ کرنش خزشی، %/sec
ε_R	کرنش شکست خزشی
t	زمان آزمون خزش، sec
ε_0	کرنش اولیه خزشی

۶- مراجع و منابع

[1] Azadi M, Safarloo S, Loghman F, Rasouli R (2018) Microstructural and thermal properties of piston aluminum alloy reinforced by nano-particles. AIP Conf Proc 1920: 020027.

[2] Azadi M, Zolfaghari M, Rezanezhad S, Azadi M (2018) Preparation of various aluminum matrix composites reinforcing by nanoparticles with different dispersion methods. Proc. Iran Int Aluminum Conf.

[3] Azadi M, Zolfaghari M, Rezanezhad S, Azadi M (2018) Effects of SiO_2 nano-particles on tribological and mechanical properties of aluminum matrix composites by different dispersion methods. Appl Phys A 124(5): 377.

[4] Ishikawa K, Okuda H, Kobayashi Y (1997) Creep behaviors of highly pure aluminum at lower temperatures. Mater Sci Eng A 234-236: 154-156.

[5] Jahromi SAJ (2002) Creep behavior of spray-cast 7XXX aluminum alloy. Mater Des 23: 169-172.

[6] Ishikawa K, Kobayashi Y (2004) Creep and rupture behavior of a commercial aluminum-magnesium alloy A5083 at constant applied stress. Mater Sci Eng A 387-389: 613-617.

[7] Dobes F, Milicka K (2004) Comparison of thermally activated overcoming of barriers in creep of aluminum and its solid solutions. Mater Sci Eng A 387-389: 595-598.

[8] Srivastava V, Williams JP, McNee KR, Greenwood GW, Jones H (2004) Low stress creep behavior of 7075 high strength aluminum alloy. Mater Sci Eng A 382: 50-56.

[9] Lina J, Kowalewskib ZL, Caoa J (2005) Creep rupture of copper and aluminum alloy under combined Loadings-experiments and their various descriptions. Int J Mech Sci 47:1038-1058.

[10] Requena G, Degischer HP (2006) Creep behavior of unreinforced and short fiber reinforced AlSi12CuMgNi piston alloy. Mater. Sci. Eng. A 420: 265-275.

[11] Couteau O, Dunand DC (2008) Creep of aluminum syntactic foams. Mater Sci Eng A 488: 573-579.

[12] Diologent F, Goodall R, Mortensen A (2009) Creep of aluminum syntactic foams. Acta Mater 57: 830-837.

[13] Jeong CY (2012) Effect of alloying elements on high temperature mechanical properties for piston alloy. Mater Trans 53: 234-239.

[14] Li LT, Lin YC, Zhou HM, Jiang YQ (2013) Modeling the high-temperature creep behaviors of 7075 and 2124 aluminum alloys by continuum damage mechanics model. Comput Mater Sci 73: 72-78.

[15] Yuana J, Wanga Q, Yina D, Wanga H, Chena C, Yea B (2013) Creep behavior of Mg-9Gd-1Y-0.5Zr (wt.%) alloy piston by squeeze casting. Mater Charact 78: 37-46.

[16] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Ichkova MD (2014) Modeling of strain hardening and creep behavior of 2024T3 aluminum alloy at room and high temperatures. Comput Mater Sci 83: 381-393.

[17] Fernandez-Gutierrez R, Requena GC (2014) The effect of spheroidization heat treatment on the creep resistance of a cast AlSi12CuMgNi piston alloy. Mater Sci Eng A 598: 147-153.

[18] Spigarelli S, Sandstrom R (2018) Basic creep modelling of aluminum. Mater. Sci. Eng. A 711: 343-349.

[19] ASTM-E13911 (2012) Standard test methods for conducting creep, creep-rupture and stress-rupture tests of metallic materials. ASTM Int.

[20] Azadi M, Azadi M (2017) Evaluation of high-temperature creep behavior in Inconel-713C nickel-based superalloy considering effects of stress levels. Mater Sci Eng A 689: 298-305.

[21] Shi D, Dong C, Yang X, Sun Y, Wang J, Liu J (2013) Creep and fatigue lifetime analysis of directionally solidified superalloy and its brazed joints based on continuum damage mechanics at elevated temperature. Mater Des 45: 643-652.

[22] Seruga D, Fajdiga M, Nagode M (2011) Creep damage calculation for thermo-mechanical fatigue. J Mech Eng 57(5): 371-378.

[23] Donchie MJ, Donchie SJ (2002) Superalloys: A technical guide. ASM Int.

[24] Dieter GE (1998) Mechanical metallurgy. Mc-Graw Hill Book Company.

[25] Eftekhari M, Fatemi A (2016) Creep behavior and modeling of neat, talc-filled, and short glass fiber reinforced thermoplastics. Compos Part B 97: 68-83.

[26] Monkman CF, Grant NJ (1956) An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests. ASTM Proc 56: 593-620.

[27] Dobes F, Milicka K (1976) The relation between minimum creep rate and time to fracture. Met Sci 10: 382-384.

[28] Creep and Swelling, Help of ABAQUS Software.

[29] Du Y, Yan N, Kortschot MT (2013) An experimental study of creep behavior of light weight natural fiber - reinforced polymer composite /honeycomb core sandwich panels. Compos Struct 106: 160-116.

[30] Findley WN (1960) Mechanism and mechanics of creep of plastics. Division of Engineering, Brown University.

[31] Hadid M, Rechak S, Tati A (2004) Long-term bending creep behavior prediction of injection molded composite using stress-time correspondence principle. Mater Sci Eng A 385(1-2): 8-54.

[32] Zhao Y, Gong J, Yong J, Wang X, Shen L, Li Q (2016) Creep behaviors of Cr25Ni35Nb and Cr35Ni45N alloys predicted by modified theta method Mater Sci Eng A 649: 1-8.

[33] Chaboche JL (1988) Continuum damage mechanics: Part I: General concepts. J Appl Mech 55: 59-64.

[34] Bahmanabadi H, Rezanezhad S, Azadi M, Azadi M (2018) Characterization of creep damage and lifetime in Inconel-713C nickel-based superalloy by stress-based, strain/strain rate-based and continuum damage mechanics models. Mater Res Express 5: 026509.

[35] Yu SB, Kim MS (2016) Microstructure and high temperature deformation of extruded Al-12Si-3Cu-based alloy. Metals 6: 32.

[36] Abe F (2014) Development of creep-resistant steels and alloys for use in power plants. Structural Alloys for Power Plants. Chapter 9, Woodhead Publishing Series in Energy.