

مطالعه تجربی ضریب انبساط گرمایی در آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم با مقایسه نتایج دیلاتومتری و آزمون نیرو- صفر

محمد مهدی علی اکبری

دانش آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران،
mah.aliakbary@yahoo.com

محمد آزادی*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m_azadi@semnan.ac.ir

ستار محمدی اسفرجانی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، satar.iran@gmail.com

حامد بهمن آبادی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران،
hamed.ba1992@gmail.com

چکیده

در این تحقیق، ضریب انبساط گرمایی دو آلیاژ سبک آلومینیوم A356 و منیزیم AZ91، بصورت تجربی با استفاده از آزمون دیلاتومتری و آزمون نیرو- صفر محاسبه شد. در آزمون نیرو- صفر، دمای نمونه در محدوده تعیین شده، بدون اعمال نیروی مکانیکی، با نرخ گرمایش و سرمایش ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه، تغییر کرده و منحنی کرنش حرارتی- دما رسم شد. مجدداً چرخه فوق، با نرخ حرارتی ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه تکرار شده و اختلاف کرنش آن با نتایج چرخه قبل، به عنوان یک ضریب تصحیح، برای آزمون اصلی، به کرنش حرارتی اضافه گردید. نتایج نشان داد که در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه، نمودار کرنش حرارتی- دما، بصورت خطی و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه، رفتار ماده به شکل حلقه هیستریزس و غیرخطی بود. درصد خطای نتایج آزمون دیلاتومتری برای نمونه آلومینیومی برابر ۴۷/۵۲ درصد و برای نمونه منیزیومی برابر ۴۸/۶۹ درصد و درصد خطای آزمون نیرو- صفر در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برای نمونه آلومینیومی برابر ۱/۶۸ درصد و برای نمونه منیزیومی برابر ۴/۷۳ درصد محاسبه گردید. **واژه‌های کلیدی:** ضریب انبساط گرمایی، آلیاژهای سبک، آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ منیزیم، آزمون نیرو- صفر، دیلاتومتری.

Experimental study on thermal expansion coefficient of light aluminum and magnesium alloys by comparing results of dilatometry and zero-force test

M. M. Aliakbari

M. Azadi

S. Mohammadi Esfarjani

H. Bahmanabadi

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In this research, the thermal expansion coefficient of two light materials, A356 aluminum and AZ91 magnesium alloys, was calculated experimentally using dilatometric and zero-force tests. In the zero-force test, the temperature of the sample, in the specified range, without applying any mechanical forces, with a heating/cooling rate of 2 °C/s, was changed and the thermal strain-temperature curve was plotted. The mentioned cycle was repeated at the temperature rate of 10 °C/s and the strain difference with the results of the previous cycle was added to the thermal strain as a correction factor during the main test. The results showed that at the rate of 2 °C/s, the thermal strain-temperature curve was linear and the material behavior was nonlinear and as a hysteresis loop at 10 °C/s. The error of dilatometric test results for aluminum samples was 47.52% and for magnesium samples was 48.69% and the error percentage of the zero-force test at 2 °C/s for aluminum samples was 1.68%, where it was 4.73% for magnesium specimens.

Keywords: Thermal expansion coefficient, Light alloys, Aluminum alloy, Magnesium alloy, Zero-force test, Dilatometry

۱- مقدمه

دارد، ثبت می‌شود و سپس نمودار تغییر طول بر حسب دما و همچنین نمودار کرنش حرارتی بر حسب دما، رسم می‌گردد [۱].

آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم، کاربردهای وسیعی در صنعت بخصوص در خودروسازی و قطعات موتور دارند [۲-۵]. کاربرد در دمای زیاد این گونه قطعات، لزوم بررسی رفتارهای حرارتی مواد را مشخص می‌کند. رفتار غیرخطی ماده تحت اثر نرخ‌های مختلف گرمایش و سرمایش، به دلیل تشکیل حلقه هیستریزس^۱ [۳]، برای مهندسان طراح، مورد اهمیت است. در ادامه، به برخی از تحقیقات در

هنگامی که یک جسم گرم می‌شود، انرژی جنبشی مولکول‌های تشکیل‌دهنده زیاد می‌شود و با افزایش این فعالیت، مولکول‌ها نیازمند فضای بیشتری هستند. همین امر باعث افزایش حجم یا انبساط جسم می‌شود. برای بیان میزان افزایش طولی یا حجمی که با افزایش دمای یکسان انجام می‌شود، ضریب انبساط گرمایی تعریف شده است که مقدار این ضریب به دو عامل تعداد ذرات جسم و میزان گرما، بستگی دارد. آزمون دیلاتومتری و نیرو- صفر از جمله روش‌های است که برای بدست آوردن ضریب انبساط گرمایی در مواد استفاده می‌شود. در آزمون دیلاتومتری، کوره الکتریکی با سرعت گرمایش دلخواه، تا دمای مورد نظر، نمونه را گرم می‌کند. برای اندازه‌گیری ضریب انبساط گرمایی به این روش، تغییر طول بر حسب دمایی که نمونه در آن قرار

¹ Hysteresis loop

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_azadi@semnan.ac.ir

زمینه محاسبه ضریب انبساط گرمایی برای آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم، اشاره می‌گردد.

آزادی و همکارانش [۶]، رفتار حرارتی و ضریب انبساط گرمایی در آلیاژهای آلومینیومی پیستون را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش، به‌منظور یافتن ضریب انبساط گرمایی با اندازه‌گیری دیلاتومتری حرارتی انجام شد. سپس اثر افزودن ذرات نانو برای تقویت آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اضافه کردن ذرات نانو SiO_2 در شبکه آلومینیومی، باعث کاهش ضریب انبساط گرمایی ماده می‌گردد. چوی و همکارانش [۷]، به بررسی رابطه بین رسوب و ضریب انبساط گرمایی آلیاژهای Al-Si-Mg-Cu(Ti) با تحلیل ترمومکانیکی^۱ و دیفرانسیل اسکن کالریمتری^۲ پرداختند. نمودارهای ضریب انبساط گرمایی برخی از کرنش‌های باقیمانده را نشان داد که با افزایش دمای پیرسازی، کاهش یافت. در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس، ضریب انبساط گرمایی بطور چشمگیری تغییر کرده و قله‌های آن در مورد نمونه‌های پیرسازی شده، به‌دلیل رفتار تهنشینی فازهای ثانویه، انتقال پیدا کرد. نتایج نشان دادند که بعد از خنک‌کاری در آب، با توجه به فرایند آنیل در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، مشابه نتایج آزمایش دیلاتومتری، طول در حدود ۰/۰۷ درصد کاهش یافت. در نتیجه دلیل اصلی تغییر ضریب انبساط گرمایی، تهنشینی فازهای Si در آلیاژهای Al-Si و تغییرات اندازه رسوبات، مرتبط بود. ترینه و همکارانش [۸]، به بررسی ریزساختار، سختی و ضریب انبساط گرمایی کامپوزیت‌های آلومینیوم/ نانوتیوب کربن (CNT/Al) ساخته شده با ترکیب روش‌های متالورژی پودر و پرس ایزواستاتیک گرم^۳ پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب انبساط گرمایی، با افزایش مقدار کربن به‌شدت کاهش می‌یابد. این ۳۰ درصد کاهش در مقایسه با ضریب انبساط گرمایی آلومینیوم خالص که می‌تواند ناشی از میکروساختار لایه‌ای با استفاده از پوسته‌های آلومینیوم، در مقابل استفاده از ذرات گرد، باشد. تافیک و سلیمان [۹]، به ایجاد مدل انبساط گرمایی کاربید سیلیکون آلومینیوم ریخته‌گری شده پرداختند. رفتار انبساط گرمایی کامپوزیت‌های تقویت شده کاربید سیلیکون آلومینیوم ریخته‌گری شده، وابسته به انبساط گرمایی فیبرها و تحت تاثیر شروع استحکام سطحی و وضعیت تنش باقیمانده است. اعتبار-سنجی، تطابق خوبی بین مدل و نتایج آزمایشی آلیاژهای LM6 تقویت شده با سیلیکون، را نشان داد. جی و همکارانش [۱۰]، به بررسی تغییر شکل میکروساختار و ضریب انبساط گرمایی آلیاژ آلومینیوم 7A09 پرداختند. آن‌ها ضریب انبساط گرمایی این آلیاژ را به‌وسیله دیلاتومتر حرارتی ثبت کردند. نتایج نشان داد که بین ضریب انبساط گرمایی و دما، وابستگی خطی وجود دارد. در طی فرایند گرم‌کاری، انقباض آلیاژ، بطور مستقیم به‌دلیل تغییر فاز است، مانند تجزیه فاز η ، تغییر فاز η به η' و تجزیه فاز η . انقباض اضافی می‌تواند افزایش ضریب انبساط گرمایی را به مقدار زیادی کم کند که در نمودار غیرخطی ضریب انبساط گرمایی بیان شود. تغییرات حجم و انرژي آلیاژ، مستقیماً بر تغییر روند ضریب انبساط گرمایی تاثیر می‌گذاشت که باعث رسوب

فاز η در طی فرایند سردکاری بود. این تاثیرات، تغییر غیرخطی ضریب انبساط گرمایی نشان داد.

طبق مطالعات انجام شده، آزمون‌های متنوعی برای بدست آوردن میزان تاثیر پارامترهای متفاوتی بر روی ضریب انبساط گرمایی در آلیاژهای سبک مختلفی همچون AlSiMg(Cu) ، منیزیم AZ91، A356/SiC و غیره، با روش‌های مختلف بدست آوردن ضریب انبساط گرمایی شامل اندازه‌گیری دیلاتومتری حرارتی، تحلیل ترمومکانیکی و دیفرانسیل اسکن کالریمتری، انجام شده است. با این وجود، تحقیقات در این زمینه، همچنان به ندرت یافت شده و با توجه به کاربرد وسیع آلیاژهای سبک در صنعت، نیازمند بررسی‌های دقیق‌تری است. ضمناً معرفی و اجرای آزمون نیرو- صفر نیز بر روی آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم و مشاهده رفتار غیرخطی ماده در سرمایش و گرمایش، از نوآوری‌های این مقاله می‌باشد. لذا در این پژوهش، به بررسی ضریب انبساط گرمایی در آلیاژهای آلومینیوم A356 و منیزیم AZ91، به روش‌های اندازه‌گیری با دو آزمون دیلاتومتری و آزمون نیرو- صفر پرداخته شده است. مقایسه نتایج دو روش فوق، از نوآوری‌های دیگر این تحقیق محسوب می‌شود.

۲- مواد و آزمایش‌ها

۲-۱- آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم

آلیاژهای آلومینیوم، دارای خواص منحصر به فردی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، جوش‌پذیری خوب، شکل‌پذیری عالی و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب هستند و لذا بطور گسترده در انواع سازه‌ها، صنایع هوایی و دریایی، حمل و نقل و خودروسازی استفاده می‌شوند [۱۱-۱۴]. امروزه نیز اکثر پیستون‌های موتور خودرو از آلیاژهای آلومینیوم ساخته می‌شوند [۱۴-۱۷]. یکی دیگر از قسمت‌های اصلی موتور خودرو نیز، شامل سرسیلندر، از آلیاژهای آلومینیوم بصورت ریخته‌گری است [۱۸]. منیزیم نیز سبک‌ترین فلز در بین تمامی فلزات سازه‌ای است. خواص مکانیکی قطعات ریخته‌گری منیزیم، این فلز را با قطعات ریخته‌گری آلومینیوم قابل رقابت نموده‌است. آلیاژهای AZ63 و AZ92 عموماً برای ریخته‌گری ماسه‌ای استفاده می‌شود. آلیاژ AZ91 بطور عمومی برای ریخته‌گری قالب فلزی تحت فشار و AZ92 برای ریخته‌گری قالب دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹].

در این تحقیق، آلیاژ آلومینیوم A356 و آلیاژ منیزیم AZ91 که بیشتر کاربرد در قطعات خودرویی و موتوری دارند، مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمناً درصد عناصر (آنالیز شیمیایی) هر دو ماده سبک مورد مطالعه، شامل آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم، در جدول ۱، بصورت مقایسه‌ای، آمده است.

^۱ Thermomechanical analyzer

^۲ Differential scanning calorimetry

^۳ Hot-isostatic-pressing

جدول ۱- درصد عناصر آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم

منیزیم AZ91	آلومینیوم A356	نوع آلیاژ سبک
۹/۰۰	عنصر پایه	عنصر آلومینیوم
عنصر پایه	۰/۳۷	عنصر منیزیم
۰/۰۴	۷/۰۶	عنصر سیلیسیم
۰/۰۶	۰/۰۲	عنصر منگنز
-	۰/۱۵	عنصر آهن
-	۰/۱۳	عنصر تیتانیوم
۱/۰۵	-	عنصر روی
۰/۶۸	-	عناصر نادر خاکی

۲-۲- آزمون دیلاتومتری

در روش دیلاتومتری، نمودار تغییر طول نمونه بر حسب تغییر دما رسم می‌شود. این روش، بیش از آن که به عنوان دستگاهی برای آنالیز و شناسایی مواد به کار رود، برای کنترل کیفی و تعیین ضریب انبساط گرمایی مورد توجه است. ضریب انبساط گرمایی در آزمون دیلاتومتری از شیب نمودار کرنش حرارتی- دما طبق رابطه (۱)، بدست می‌آید.

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T} \quad (1)$$

آزمون دیلاتومتری بر روی سه نمونه آلیاژ آلومینیوم و یک نمونه آلیاژ منیزیم، به شکل استوانه‌ای با قطر ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر، با نرخ ۰/۲ درجه سلسیوس بر ثانیه انجام شده است [۲۰]. استاندارد مدنظر برای اجرای آزمون‌های دیلاتومتری نیز شامل ASTM-E831 بوده است.

۳-۲- آزمون نیرو- صفر

کرنش حرارتی برای یک ماده، در طول یک چرخه دمایی تحت نیروی صفر، می‌تواند اندازه‌گیری می‌شود. رابطه کرنش حرارتی و دما معمولاً یک رابطه خطی فرض می‌گردد اما امکان شکل‌گیری حلقه هیستریزس به علت توزیع دمای متغیر در طول نمونه، در مدت زمان گرمایش و سرمایش یا خطاهای اندازه‌گیری دما ناشی از خنک‌سازی فعال، وجود دارد. بسته به روش انتخاب شده، اصلاح کرنش حرارتی (دما- یا زمان- پایه)، دو روش مختلف اندازه‌گیری کرنش حرارتی لازم هستند [۲۱].

اجرای آزمون نیرو- صفر شامل بخشی از آزمون خستگی ترمومکانیکی کرنش- کنترل با استاندارد COP-EUR22281EN و ASTM-E2368 است. تجهیزات شامل ترموکوپل‌ها، نمونه، دستگاه خوانش کرنش، فک‌های خنک شونده (با آب)، کوپل مسی، دستگاه تولید حرارت القایی و جت هوای فشرده است [۱]. دمای داخل و سطح نمونه با ترموکوپل (نوع K) و کرنش، با دستگاه خوانش کرنش دما^۱ بالا اندازه‌گیری می‌شوند. سرمایش، از طریق جت هوای فشرده روی نمونه اجرا می‌گردد. سیستم گرمایش شامل تولید حرارت القایی، با استفاده از کوپل‌های مسی است [۱].

در آزمون نیرو- صفر، دمای نمونه در محدوده تعیین شده، بدون اعمال هیچ‌گونه نیروی مکانیکی، با نرخ گرمایش و سرمایش ۲ درجه

سلسیوس بر ثانیه، تغییر کرده و منحنی کرنش حرارتی- دما رسم می‌شود. در ادامه، مجدداً چرخه فوق، با نرخ حرارتی ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه تکرار شده و اختلاف کرنش آن با نتایج چرخه قبل، به عنوان یک ضریب تصحیح، در طول آزمون اصلی، به کرنش حرارتی اضافه می‌شود. علت این امر آن است که رفتار ماده در نرخ گرمایش و سرمایش بصورت گذرا می‌باشد و با اعمال ضریب تصحیح کرنش حرارتی، این رفتار جبران می‌گردد [۱]. البته برای حذف اثر فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی (K_{TM}) و مقایسه بهتر نمودارها با یکدیگر ضرایب تصحیحی برای هر یک از مواد در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه، در نظر گرفته شده که آن کمینه مقدار کرنش حرارتی بدست آمده از فرمول‌های (۲) و (۳) است [۲۰].

$$\varepsilon_{thermal} = \varepsilon_{total} + \varepsilon_{mechanical} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{mechanical} = \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

در فرمول (۳)، E مدول الاستیک ماده است که در فرمول از هر دو مدول الاستیک استاتیکی و دینامیکی استفاده شده است. در جدول ۲ مقادیر میانگین مدول الاستیک اندازه‌گیری شده برای آلیاژهای آلومینیوم و آلیاژهای منیزیم، برای مقایسه بهتر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدول الاستیک سیکلیک برای هر دو آلیاژ آلومینیوم و منیزیم از مدول الاستیک مونوتونیک کمتر است. در نهایت، ضریب انبساط گرمایی ماده، از رابطه (۴) می‌تواند بدست آید [۲۰].

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (4)$$

در ادامه، مشخصات نمونه‌های آزمون نیرو- صفر انجام شده در این پژوهش، در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین، ابعاد نمونه‌های آزمون نیرو- صفر برای آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم در شکل ۱ نشان داده شده است. برای حذف اثر فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی (K_{TM}) در نمودارهای دما- کرنش حرارتی، با استفاده از مدول الاستیک، یک ضریب تصحیح در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- میانگین مدول الاستیک آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم [۱]

آلیاژ	میانگین مدول الاستیک مونوتونیک (GPa)	میانگین مدول الاستیک سیکلیک (GPa)
آلومینیوم	۶۴/۵۸	۶۲/۰۹
منیزیم	۳۹/۲۵	۳۷/۴۲

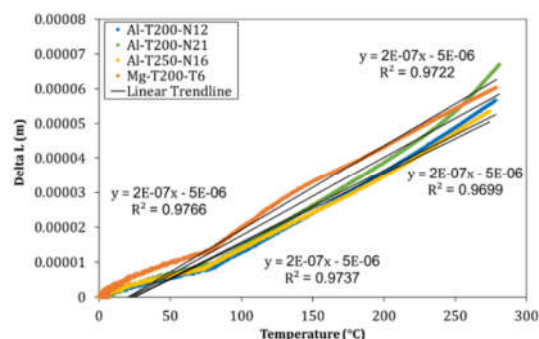
جدول ۳- مشخصات نمونه‌های آزمون نیرو- صفر

ماده	شماره نمونه	بیشینه دمای آزمون (درجه سلسیوس)	K_{TM} (%)
آلومینیوم	Al-N12	۲۰۰	۱/۲۵
آلومینیوم	Al-N21	۲۰۰	۱/۲۵
آلومینیوم	Al-N16	۲۵۰	۰/۷۵
منیزیم	Mg-N06	۲۰۰	۰/۷۵

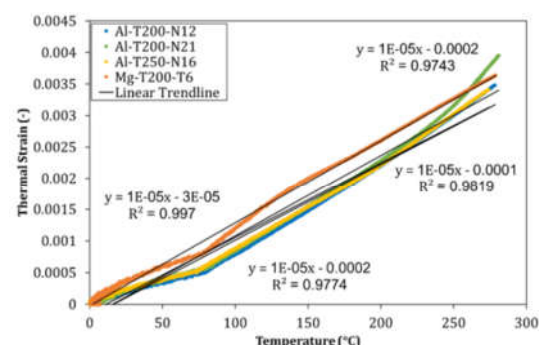
^۱ K-type thermocouple

^۲ High temperature extensometer

نتایج مطالعه گریب و همکارانش مطابقت دارد [۲]. شیب نمودار شکل-های ۲ و ۳ در این تحقیق بیشتر از نتایج مطالعه گریب و همکارانش است که دلیل آن تفاوت میزان سیلیکون در نمونه‌ها است. هرچه میزان سیلیکون در ریزساختارها بیشتر باشد، شیب نمودار کمتر است [۲]. تاثیر میزان سیلیکون در شیب ضریب انبساط گرمایی خطی نسبت به تغییر دما توسط کیناست^۱ و همکارانش نیز گزارش شده است [۲۴].

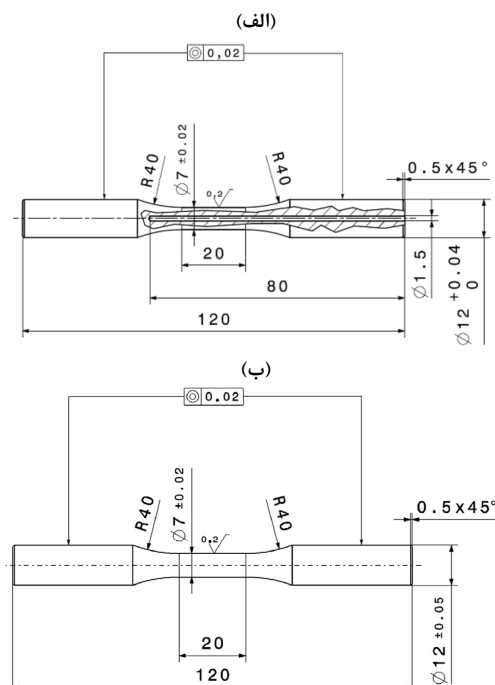


شکل ۲- تغییرات طول بر حسب دمای نمونه‌های آزمون



شکل ۳- کرنش حرارتی بر حسب دمای نمونه‌های آزمون

در جدول ۴ مقادیر ضریب انبساط گرمایی بدست آمده از این آزمون به همراه مقادیر از مرجع [۲۳] نشان داده شده است. در جدول ۴ طبق نتایج آزمون دیلاتومتری، میانگین خطای محاسبه شده ضریب انبساط گرمایی برای آلیاژ آلومینیوم برابر با ۴۷/۵۳ درصد و برای آلیاژ منیزیم ۴۸/۶۹ درصد می‌باشد. همچنین بیشینه درصد خطا برای آلیاژ آلومینیوم N16 با ۴۹/۱۹ درصد و کمینه درصد خطا برای آلیاژ آلومینیوم N21 با ۴۵/۱۵ درصد بدست آمده است.



شکل ۱- ابعاد نمونه آزمون نیرو- صفر برای (الف) نمونه آلومینیومی [۱] و (ب) نمونه منیزیمی [۲۲]

۲-۴- برآورد خطا

فرمول‌های درصد خطای محاسبه شده برای آزمون‌های دیلاتومتری و نیرو- صفر در مقایسه با مرجع [۲۳] در روابط (۵) و (۶) و همچنین فرمول خطای نسبی مقادیر بدست آمده از این دو آزمون در رابطه (۷)، نشان داده شده است. البته رابطه آخر، اختلاف نتایج تجربی به دو روش آزمون مختلف است.

$$E(1) = \frac{\alpha_{dilatometry} - \alpha_{[23]}}{\alpha_{dilatometry}} \times 100 \quad (5)$$

$$E(2) = \frac{\alpha_{zero-force} - \alpha_{[23]}}{\alpha_{zero-force}} \times 100 \quad (6)$$

$$E(3) = \frac{\alpha_{dilatometry} - \alpha_{zero-force}}{\alpha_{dilatometry}} \times 100 \quad (7)$$

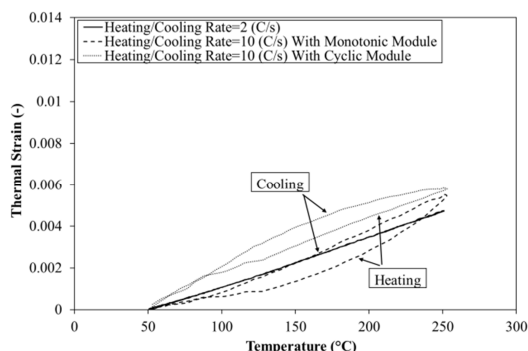
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون دیلاتومتری

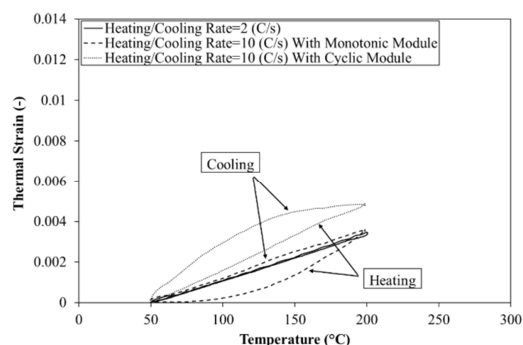
آزمون دیلاتومتری در نرخ ۰/۲ درجه سلسیوس بر ثانیه انجام شد که در شکل ۲ نمودار تغییرات طول بر حسب دما و در شکل ۳ نمودار کرنش حرارتی بر حسب دمای سه نمونه آلیاژ آلومینیومی و یک نمونه آلیاژ منیزیمی، نشان داده شده است.

مطابق با شکل ۲، خط رگرسیون از نقطه (۲۵ درجه سلسیوس) می‌گذرد که نشان دهنده این است که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تغییرات طول صفر است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در تمام آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم ضریب انبساط گرمایی خطی با افزایش دما افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش احتمال حرکت نوسانی اتم‌ها در شبکه کریستال در دماهای بالاتر است. این نتیجه با

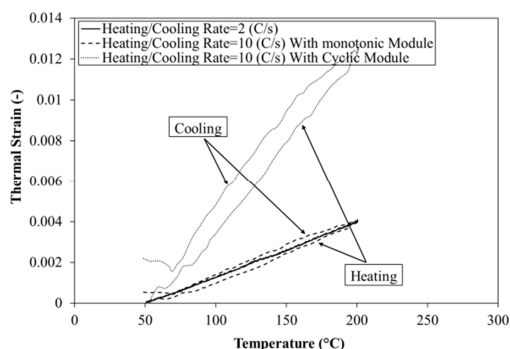
¹ Kinast et al.



شکل ۴- کرنش حرارتی بر حسب دما نمونه آلومینیومی Al-N16



شکل ۵- کرنش حرارتی بر حسب دما نمونه آلومینیومی Al-N12



شکل ۶- کرنش حرارتی بر حسب دما نمونه منیزیمی Mg-N06

در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمودار ضریب تصحیح بر حسب دما در دو حالت سرد شدن و گرم شدن نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نمودار تنش بر حسب کرنش رسم شده است که در آن کرنش‌های مکانیکی، حرارتی و کل نشان داده شده است که براساس فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی (K_{TM}) آن‌ها که در جدول ۳ ذکر شده است، نمودار به سمت چپ یا راست متمایل می‌شود و فرمول (۸) نشان‌دهنده این است [۱]. در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ که دارای فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی (K_{TM}) برابر با ۰/۷۵ است، نمودار به سمت راست متمایل شده است و شکل ۱۱ که دارای فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی (K_{TM}) برابر با ۱/۲۵ است، نمودار به سمت چپ متمایل شده است.

جدول ۴- نتایج بدست آمده از آزمون دیلاتومتري

خطای نسبی (%) $E(1)$	ضریب انبساط گرمایی $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ مرجع [۲۳]	ضریب انبساط گرمایی $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ (محاسبه شده)	نوع ماده	جنس
۴۸/۲۴	۲/۳۴×۱۰ ^{-۵}	۱/۲۱۱۲×۱۰ ^{-۵}	Al-N12	آلومینیوم
۴۵/۱۵		۱/۲۸۳۶×۱۰ ^{-۵}	Al-N21	آلومینیوم
۴۹/۱۹		۱/۱۸۹۰×۱۰ ^{-۵}	Al-N16	آلومینیوم
۴۸/۶۹	۲/۵۲×۱۰ ^{-۵}	۱/۳۱۳۵×۱۰ ^{-۵}	Mg-N06	منیزیم

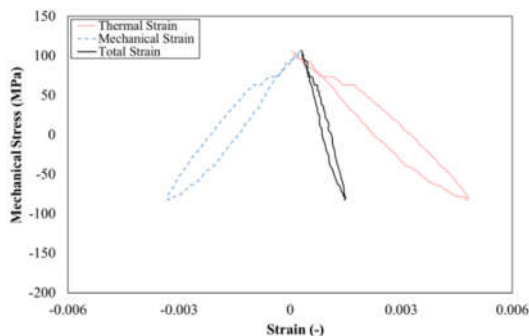
۲-۳- نتایج آزمون نیرو- صفر

آزمون نیرو- صفر در دو نرخ ۲ و ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه انجام شده است که طبق نتایج، نمودارها در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه خطی شده است و نمودارها در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه به شکل هیستریزیس شده‌اند که این نشان دهنده رفتار گذرا ماده است که شکل‌های ۴ تا ۶ نمودار کرنش حرارتی را بر حسب دما در دو نرخ ۲ و ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه را برای چهار نمونه آزمون شده، نشان می‌دهد. الگوی چرخه‌های سرد کردن و گرم کردن که شکل‌های ۴ تا ۶ آمده است از لحاظ تعقر، تحذب، با نتایج تحقیق طبیعی و همکارانش مطابقت دارد [۲۵]. همچنین الگوی چرخه‌ها در شکل‌های ۴ تا ۶ نمودار کرنش حرارتی را بر حسب دما با افزایش نرخ سرد کردن و گرم کردن با نتایج تحقیق نسان^۱ و همکارانش مطابقت دارد. کرنش حرارتی بیشتری در هرچه نرخ سرد کردن و گرم کردن بالاتر بدست می‌آید [۲۶]. در جدول ۵ مشخصات نمونه‌های آزمون نیرو- صفر و در جدول ۶ ثوابت تابع درجه سه برای کرنش حرارتی بر حسب دمای آن‌ها و در جدول ۵ مقادیر ضریب انبساط گرمایی بدست آمده از آزمون نیرو- صفر به همراه مقادیر ضریب انبساط گرمایی مرجع [۲۳] نشان داده شده است. طبق جدول ۵، میانگین عمر نمونه‌های آزمون نیرو- صفر برای آلیاژهای آلومینیوم برابر ۹۱۱۴/۳ چرخه و برای آلیاژ منیزیم برابر ۴۸۵۱ می‌باشد که کمینه عمر برای آلیاژ منیزیم N06 با ۴۸۵۱ چرخه و بیشینه عمر برای آلیاژ آلومینیوم N16 با ۹۹۹۵ چرخه، بدست آمده است. در جدول ۶، طبق نتایج بدست آمده از آزمون نیرو- صفر، میانگین خطای محاسبه شده ضریب انبساط گرمایی برای آلیاژ آلومینیوم در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۱/۶۸ درصد و در نرخ ۱۰ سلسیوس درجه بر ثانیه برابر ۱/۳۴ درصد و برای آلیاژ منیزیم در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۴/۷۳ و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۳/۵ درصد گزارش شده است.

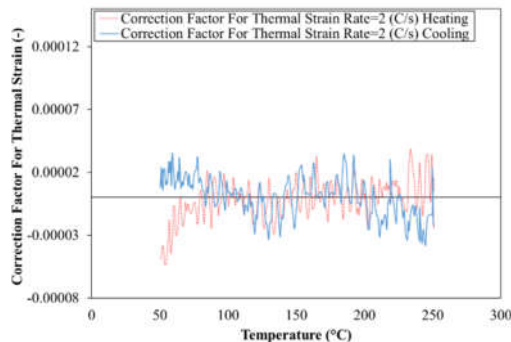
جدول ۵- نتایج بدست آمده از آزمون دیلاتومتري

عمر نمونه (چرخه)	ضریب تصحیح	شماره نمونه	جنس
۸۳۸۳	۰/۰۰۳۶۴۰	Al-N12	آلومینیوم
۸۹۶۵	۰/۰۰۶۱۷۵	Al-N21	آلومینیوم
۹۹۹۵	۰/۰۰۳۰۸۰	Al-N16	آلومینیوم
۴۸۵۱	۰/۰۰۶۱۷۵	Mg-N06	منیزیم

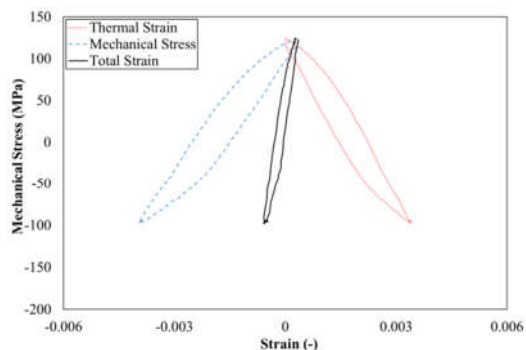
^۱ Natesan et al.



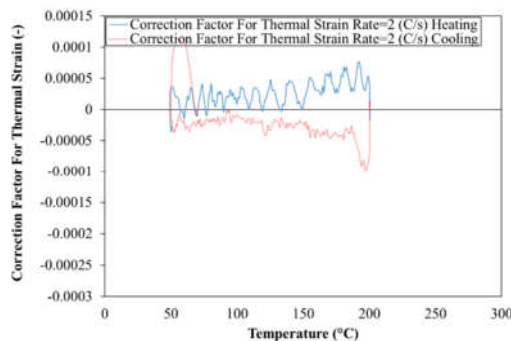
شکل ۱۰- تنش بر حسب کرنش‌های حرارتی، مکانیکی و کل نمونه آلومینیومی Al-N16



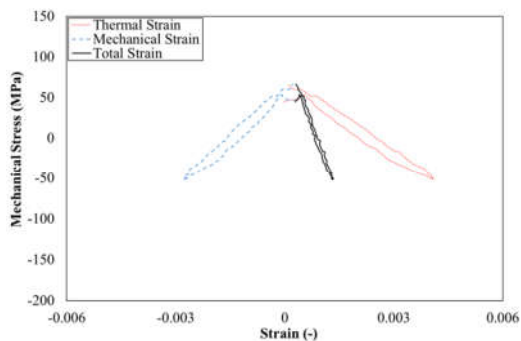
شکل ۷- ضریب تصحیح برای کرنش حرارتی بر حسب دما نمونه آلومینیومی Al-N16



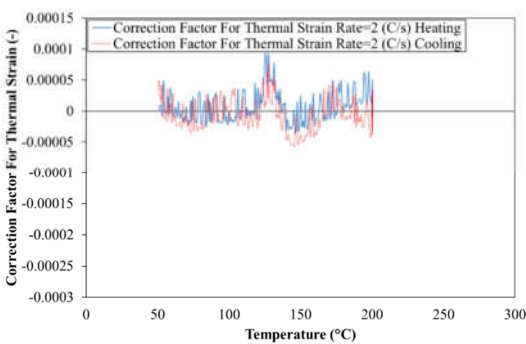
شکل ۱۱- تنش بر حسب کرنش‌های حرارتی، مکانیکی و کل نمونه آلومینیومی Al-N12



شکل ۸- ضریب تصحیح برای کرنش حرارتی بر حسب دما نمونه آلومینیومی Al-N12



شکل ۱۲- تنش بر حسب کرنش‌های حرارتی، مکانیکی و کل نمونه منیزیومی Mg-N06



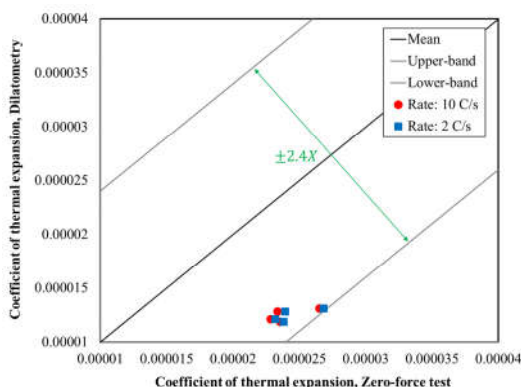
شکل ۹- ضریب تصحیح برای کرنش حرارتی بر حسب دما نمونه منیزیومی Mg-N06

جدول ۶- ثوابت تابع درجه سه برای کرنش حرارتی بر حسب دمای نمونه‌های آزمون نیرو- صفر

شماره نمونه	$\varepsilon_{th} = A + B \times T + C \times T^2 + D \times T^3$			
	A	$B \times 10^{-5}$	$C \times 10^{-8}$	$D \times 10^{-11}$
Al-N12	-۰/۰۰۱۰۴	۲/۰۰۵۶۳	۱/۲۰۴۹۰	-۰/۴۵۱۶۸
Al-N21	-۰/۰۰۰۱۱	۲/۱۰۵۳۸	۱/۲۶۱۰۶	-۱/۶۶۶۱۸
Al-N16	-۰/۰۰۰۸۵	۱/۵۱۵۱۴	۴/۸۶۹۷۵	-۸/۰۷۱۵۲
Mg-N06	-۰/۰۰۱۱۶	۲/۱۸۵۱۲	۲/۸۸۲۷۹	-۴/۶۰۶۵۷

جدول ۷- نتایج بدست آمده از آزمون دیلاتومتري

نوع ماده	ضریب انبساط گرمایی $\times 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$			خطای نسبی $E(2) (\%)$	
	پژوهش حاضر نرخ $2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$	پژوهش حاضر نرخ $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$	مرجع [۲۳]	نرخ $2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$	نرخ $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$
Al-N12	۲/۳۱۵۷	۲/۲۸۱۷	۲/۳۴	۱/۰۳	۲/۴۹
Al-N21	۲/۳۹۲۷	۲/۳۳۳۸		۲/۲۵	۰/۲۶
Al-N16	۲/۳۸۰۹	۲/۳۵۵۵		۱/۷۵	۰/۶۶
Mg-N06	۲/۶۸۱۲	۲/۶۴۹۷	۲/۵۲	۴/۷۳	۳/۵۰



شکل ۱۳- نمودار محدوده پراکندگی برای نتایج آزمون‌های دیلاتومتري و نیرو- صفر در نرخ ۲ و ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از دو روش آزمون دیلاتومتري و آزمون نیرو- صفر برای محاسبه ضریب انبساط گرمایی آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم، استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدول الاستیک سیکلیک برای هر دو آلیاژ آلومینیوم و منیزیم از مدول الاستیک مونوتونیک کمتر است. میانگین عمر نمونه‌های آزمون نیرو- صفر برای آلیاژهای آلومینیوم برابر ۹۱۱۴ چرخه و برای آلیاژ منیزیم برابر ۴۸۵۱ چرخه می‌باشد که کمینه عمر برای آلیاژ منیزیم N06 با ۴۸۵۱ چرخه و بیشینه عمر برای آلیاژ آلومینیوم N16 با ۹۹۹۵ چرخه، بدست آمد.

طبق نتایج آزمون دیلاتومتري، میانگین خطای محاسبه شده ضریب انبساط گرمایی برای آلیاژ آلومینیوم برابر با ۴۷/۵۳ درصد و برای آلیاژ منیزیم ۴۸/۶۹ درصد می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده از آزمون نیرو- صفر، میانگین خطای محاسبه شده ضریب انبساط گرمایی برای آلیاژ آلومینیوم در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۱/۶۸ درصد و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۱/۳۴ درصد و برای آلیاژ منیزیم در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۴/۷۳ و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۳/۵۰ درصد گزارش شده است.

مقایسه نتایج دو آزمون دیلاتومتري و نیرو- صفر نشان داد که اختلاف دو روش در بدترین شرایط، در حدود ۵۱ درصد است. ضمناً نمودار هر دو محدوده پراکندگی نتایج آزمون‌های دیلاتومتري و نیرو- صفر در نرخ ۲ و ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه، در محدوده ۲.۴X، قرار

۳-۳- مقایسه نتایج

جدول ۷ مقایسه نتایج ضریب انبساط گرمایی آزمون دیلاتومتري و آزمون نیرو- صفر را به همراه درصد خطا آن‌ها در دو نرخ ۲ و ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه طبق رابطه (۶) محاسبه شده است، نشان می‌دهد. در جدول ۷، مقادیر ضریب انبساط گرمایی مراجع مختلف برای مقایسه آورده شده است. درصد اختلاف ضریب انبساط گرمایی بدست آمده از این پژوهش در مقایسه با سایر مراجع برای آلیاژ آلومینیوم در آزمون دیلاتومتري و در آزمون نیرو- صفر در جدول ۷ نشان داده شده است و همچنین در شکل ۱۳ نمودار محدوده پراکندگی نتایج آزمون‌های دیلاتومتري و نیرو- صفر، نشان داده شده است.

طبق جدول ۷، میانگین خطای محاسبه شده ضریب انبساط گرمایی شامل مقدار $E(2)$ مطابق با رابطه (۶)، برای آلیاژ آلومینیوم در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۱/۶۸ درصد و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۱/۳۴ درصد و برای آلیاژ منیزیم در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۴/۷۳ و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه برابر ۳/۵۰ درصد گزارش شده است. کمینه درصد خطا برای آلیاژ آلومینیوم N21 با ۰/۲۶ درصد در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه و بیشینه درصد خطا برای آلیاژ منیزیم N06 با ۴/۷۳ درصد در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه بدست آمده است.

در مقایسه نتایج دو آزمون دیلاتومتري و نیرو- صفر، میانگین درصد خطا شامل مقدار $E(3)$ مطابق با رابطه (۷)، در نرخ ۲ درجه سلسیوس بر ثانیه در آزمون نیرو- صفر برای آلیاژ آلومینیوم برابر ۴۸/۰۳ درصد (میانگین ۳ داده برای ۳ نمونه آلومینیومی) و برای آلیاژ منیزیم ۵۱/۰۱ درصد و در نرخ ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه برای آلیاژ آلومینیوم ۴۷/۱۳ درصد (میانگین ۳ داده برای ۳ نمونه آلومینیومی) و برای آلیاژ منیزیم ۵۰/۴۰ درصد گزارش شده است.

در شکل ۱۳، نمودار هر دو محدوده پراکندگی نتایج آزمون‌های دیلاتومتري و نیرو- صفر در نرخ ۲ و ۱۰ درجه سلسیوس بر ثانیه، در محدوده ۲.۴X، قرار گرفته است که نشان دهنده دقت مناسب در هر دو روش شامل دو آزمون دیلاتومتري و نیرو- صفر برای آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم می‌باشد.

خطاهای نسبی مختلف یا به عبارت بهتر، اختلافات نسبی متفاوت، باعث ایجاد اختلاف در نتایج دو آزمون نیرو- صفر و دیلاتومتري شده است که عبارتند از موارد زیر می‌باشد:

- اجرای هر دو آزمون در نرخ‌های مختلف گرمایش و سرمایش
- اجرای آزمون دیلاتومتري فقط در حالت گرمایش (در حالت سرمایش، اندازه‌گیری نشده است).
- هندسه و ابعاد نمونه آزمون (متفاوت بودن ابعاد نمونه در دو آزمون) و تاثیر آن بر داده‌ها (در آزمون دیلاتومتري، ممکن است تغییر حجم وجود داشته که اندازه‌گیری نشده است).
- تغییر طول پایه در آزمون دیلاتومتري

گرفته است که نشان از دقت مناسب هر دو روش برای آلیاژهای سبک دارد.

۵- نمادها

T	دما (°C)
α	ضریب انبساط گرمایی
ε	کرنش
σ	تنش (Pa)
ε_{total}	کرنش کل
$\varepsilon_{mechanical}$	کرنش مکانیکی
K_{TM}	فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی

۶- مراجع

- [۱] آزادی م.، ارائه مدل پیش‌بینی عمر خستگی ترمومکانیکی آلیاژ آلومینیوم (A356) با پوشش حالت حرارتی، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، ایران، ۱۳۹۲.
- [2] Grieb M.B., Christ H.-J., Plege B., Thermomechanical fatigue of cast aluminium alloys for cylinder head applications - experimental characterization and life prediction, *Procedia Engineering*, Vol. 2, pp. 1767-1776, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.190>
- [3] Jeong C., High temperature mechanical properties of AlSiMg(Cu) alloys for automotive cylinder heads, *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 4, pp. 588-594, 2013. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2012285>
- [4] Abderrazak K., Bannour S., Mhiri H., Lepalec G., Autric M., Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy, *Computational Materials Science*, Vol. 44, No. 3, pp. 858-866, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.06.002>
- [5] Cox J., Luong D. D., Shunmugasamy V. C., Gupta N., Ili O. M. S., Cho K., Dynamic and thermal properties of aluminum alloy A356/Silicon carbide hollow particle syntactic foams, *Metals*, Vol. 4, No. 47, pp. 530-548, 2014. <https://doi.org/10.3390/met4040530>
- [6] Azadi M., Safarloo S., Loghman F., Microstructural and thermal properties of piston aluminum alloy reinforced by nano-particles, *AIP Conference Proceedings* 1920, 020027, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5018959>
- [7] Choi S. W., Cho H. S., Kumai S., Influence of precipitation on the coefficient of thermal expansion of Al-Si-Mg-Cu-(Ti) alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 655, pp. 6-10, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.207>
- [8] Trinh P. V., Luan N. V., Phuong D. D., Minh P. N., Weibel A., Mesguich D., Laurent C., Microstructure, microhardness and thermal expansion of CNT/Al composites prepared by flake powder metallurgy, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 105, pp. 126-137, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.11.022>
- [9] Taufik R. S., Sulaiman S., Thermal expansion model for cast aluminum silicon carbide, *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 392-398, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.197>
- [10] Ji H., Yuan L., Shan D., Effect of microstructure on thermal expansion coefficient of 7A09 aluminum alloy, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 9, pp. 797-801, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60145-X](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60145-X)
- [11] Mohammadi Esfarjani S., Salehi M., Damage identification in aluminum T3-2024 alloy via cross correlation functions, *The 15th International Conference of Iranian Aerospace*, March 1-3, Tehran, Iran, 2016. (In Persian) http://research.iaun.ac.ir/pd/msalehi/pdfs/PaperC_8626.pdf
- [12] Mohammadi Esfarjani S., Salehi M., Detection of metallic impurities in alloys using the IPV and AMV methods, *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, Vol. XIII, No. 2, pp. 131-137, 2016. http://sra.ro/Arhiva/2016/nr2/Paper_11_page131-137.pdf
- [13] Mohammadi Esfarjani S., Evaluation of effect changing temperature on lamb-wave based structural health monitoring, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, Vol. 3(43), No. 4, pp. 329-336, 2020. <https://doi.org/10.30464/jmee.2019.3.4.329>
- [۱۴] ذوالفقاری م.، بررسی اثر افزودن ذرات نانو بر عمر خستگی پرچرخه خمشی در آلیاژ آلومینیوم پیستون موتور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ایران، ۱۳۹۷.
- [15] Azadi M., Rezanezhad S., Zolfaghari M., Azadi M., Effects of various ageing heat treatments on microstructural features and hardness of piston aluminum alloy, *International Journal of Engineering: Basics, Applications and Aspects*, Vol. 32, No. 1, pp. 92-98, 2019.
- [16] Azadi M., Bahmanabadi H., Gruen F., Winter G., Evaluation of tensile and low-cycle fatigue properties at elevated temperatures in piston aluminum-silicon alloys with and without nano-clay-particles and heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 788, 139497, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139497>
- [17] Zolfaghari, M., Azadi, M. Azadi, M. Characterization of high-cycle bending fatigue behaviors for piston aluminum matrix SiO₂ nano-composites in comparison with aluminum-silicon alloys, *International Journal of Metalcasting*, Vol. 15, pp. 152-168, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00437-y>
- [18] Ceschini L., Morri A., Morri A., Pivetti G., Predictive equations of the tensile properties based on alloy hardness and microstructure for an A356 gravity die cast cylinder head, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1367-1375, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.014>
- [19] Azadi M., Cyclic thermo-mechanical stress, strain and continuum damage behaviors in light alloys during fatigue lifetime considering heat treatment effect, *International Journal of Fatigue*, Vol. 99, No. 2, pp. 303-314, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.12.001>
- [20] Beer F. P., Johnston E., DeWolf J. T., Mazurek D. F., *Mechanics of Materials*, McGraw Hill Education, Seventh Edition, 2006.
- [21] Hahner P., Affeldt E., Beck T., Klingelhofer H., Loveday M., Rinaldi C., *Validated Code-of-Practice for Thermo-Mechanical Fatigue Testing*, European Commission Joint Research Center, 2006.
- [22] Azadi M., Farrahi G. H., Winter G., Eichseder W., Fatigue lifetime of AZ91 magnesium alloy subjected to cyclic thermal and mechanical loadings, *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 639-644, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.075>
- [23] *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, Vol. 2, 1992. <https://doi.org/10.31399/asm.lb.v02.9781627081627>
- [24] Kinast J., Grabowski K., Rohloff R. R., Risse S., Tunnermann A., Dimensional stability of metal optics on nickel plated AlSi40, *Proceedings, Vol. 10563, International Conference on Space Optics*, 105635W, 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2304139>
- [۲۵] طیبی م.، شریفی ح.، غیور ح.، رفتار انبساط حرارتی کامپوزیت‌های Al-Cu/SiC 4% ساخته شده به روش متالورژی پودر، *فرا‌بندهای نوین در مهندسی مواد*، دوره ۹، شماره ۱، صفحه ۱۷۹-۱۹۱، ۱۳۹۴.
- [26] Natesan E., Eriksson S., Ahlstrom J., Persson C., Effect of temperature on deformation and fatigue behavior of A356-T7 cast aluminum alloys used in high specific power IC engine cylinder heads, *Materials*, Vol. 13, No. 5, p. 1202, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051202>