

مطالعه اثر نرخ بارگذاری بر خواص کششی آلیاژ آلومینیوم و نانو کامپوزیت پایه آلومینیومی

محمد آزادی*

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

محمد زمردی پور

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mohammad.zomor@yahoo.com

عبدالاحسین فریدون

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، afereidoon@semnan.ac.ir

چکیده

در این مقاله، اثر نرخ بارگذاری بر خواص کششی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم پیستون، با و بدون نانو ذرات سیلیکا، مورد مطالعه قرار گرفته است. بر روی نمونه‌های ریخته‌گری شده، آزمون کشش در نرخ‌های مختلف بارگذاری انجام گرفت. سپس، داده‌های تجربی با استفاده از نرم‌افزار Minitab، تحلیل حساسیت شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری در نمونه‌های بدون نانو، تنش تسلیم و درصد ازدیاد طول، به ترتیب، افزایش و کاهش می‌یابد. تصاویر ریزساختار نیز، نشان می‌دهد که نانو سیلیکا به سیلیسیوم زمینه آلیاژ، پیوسته و سیلیسیوم بیشتری در زمینه آلیاژ آلومینیوم دیده می‌شود. اما ابعاد دانه‌های سیلیسیوم در نانو کامپوزیت کوچکتر شده است. همچنین، تحلیل سطوح شکست مشخص نمود که افزایش نرخ بارگذاری در بارگذاری کششی و افزودن نانو ذرات، رفتار تردی شکست نمونه‌ها را افزایش داده است.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم، نانو کامپوزیت پایه آلومینیومی، خواص کششی، اثر نرخ بارگذاری، تحلیل حساسیت.

Study of effect of loading rate on tensile properties of aluminum alloy and aluminum matrix nano-composite

M. Azadi

M. Zomorodipour

A. H. Fereidoon

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 the present article, the impact of the loading rate on tensile features of the piston aluminum-silicon alloy, with and without silica nano-particles has been studied. Tensile tests were performed on casted specimens at different loading rates. Then, obtained experimental data were analyzed by the Minitab software, for the sensitivity analysis to find the effect of the loading rate on tensile properties. Results showed that in samples without silica nano-particles, the yield stress and the elongation of the material increased and decreased, respectively; when the loading rate increased. Microstructure images indicated that silica nano-particles were embedded to the silicon element. As a result, higher values of the silicon element were found in the aluminum matrix. However, the size of silicon particles was smaller in the nano-composite. The fracture surface illustrated that by increasing the loading rate in tensile testing and by the addition of silica nano-particles, the brittleness of the material increased.

Keywords: Aluminum-silicon alloy, Aluminum matrix nano-composite, Tensile properties, Loading rate, Sensitivity analysis.

۱- مقدمه

رفت و برگشتی بوده و نیروهای ناشی از احتراق را در سرعت‌های دورانی متفاوت موتور (از حدود ۷۰۰ تا ۷۰۰۰ دور بر دقیقه)، تحمل می‌کند [۱]. بنابراین دانستن رفتار ماده مورد استفاده در ساخت پیستون، در مقابل نرخ‌های مختلف بارگذاری، اهمیت پیدا می‌کند. علاوه بر لزوم شناخت رفتار مواد، مهندسان طراح به دنبال افزایش استحکام ماده مورد استفاده در قطعات مختلف هستند که یکی از این روش‌های استحکام‌بخشی، افزودن ذرات نانو می‌باشد. لذا در این مقاله، اثر نرخ بارگذاری بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم که در ساخت پیستون موتور خودرو کاربرد دارد، مطالعه شده است. همچنین، اثر افزودن ذرات نانو، به منظور تقویت خواص مکانیکی این آلیاژ آلومینیوم نیز، بررسی شده است. لذا برای این منظور، از داده‌های تجربی حاصل از آزمون کشش، در فرکانس‌های مختلف بارگذاری، استفاده شده است. در این زمینه مقالاتی ارائه شده است که در ادامه، به برخی اشاره می‌گردد.

مظاهری و شعبانی [۲]، خواص مکانیکی کامپوزیتی با ماتریس آلومینیومی A356 تقویت شده با ذرات نانو SiC را بررسی کردند. آنها

امروزه، کاربرد آلیاژهای آلومینیوم در قطعات خودرو و موتور، بطور وسیعی گسترش یافته است. یکی از این قطعات پیچیده، پیستون موتور است که تحت بارهای (توام) مکانیکی و حرارتی، تحت نرخ‌های مختلف بارگذاری، قرار دارد و لذا باید استحکام کافی، در مقابل بارگذاری‌های متنوع را داشته باشند.

یکی از ابزارهای مهندسان در طراحی قطعات موتور، فرایندهای شبیه‌سازی است. برای این منظور، لازم است که مدل‌های رفتاری ماده، قبلاً شناسایی شده باشند. بنابراین شناخت رفتار ماده تحت فرکانس‌های مختلف بارگذاری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چراکه بررسی رفتار فلزات در نرخ‌های مختلف بارگذاری (تنش یا کرنش)، کاربردهای مهندسی بسیار زیادی دارد و با علم به این که قطعات موتور در معرض چه نوعی از بارگذاری هستند و با دانستن رفتار ماده بکار رفته در برابر نرخ بار اعمال شده، می‌توان مشخص کرد که کدام ماده، برای استفاده بهینه، مناسب‌تر می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه ماده مورد مطالعه در این مقاله، مربوط به پیستون موتور است، این قطعه دارای حرکتی

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

با روش کامپوکستینگ نانو ذرات را به آلیاژ آلومینیوم اضافه کردند و نشان دادند که توزیع یکنواختی از ذرات نانو با حداقل تخلخل وجود داشت. ضمناً حضور تقویت کننده نانو، منجر به بهبود قابل توجهی در سختی، افزایش ۰/۲ درصدی در استحکام و استحکام کشش نهایی شد. اکبری و همکارانش [۳]، خواص کششی و رفتار شکست آلیاژ آلومینیوم A356 تقویت شده با ذرات میکرو و نانو TiB_2 را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تخلخل با افزایش درصد حجمی تقویت کننده (نانو) و کاهش اندازه ذرات، افزایش یافت. مقدار بهینه برابر با ۱/۵ درصد حجمی از نانو به آلیاژ معرفی شد که باعث افزایش قابل توجهی در استحکام کششی و چقرمگی گردید. کوالیر و همکارانش [۴]، رفتار کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که تراکم مواد به شدت با افزودن درصد نانولوله‌های کربنی، افزایش می‌یابد. کاهش تخلخل نیز موجب افزایش قابل توجهی در سختی و مدول الاستیک ماده می‌شود و مقاومت کششی را نیز افزایش می‌دهد.

چندراشکار و همکاران [۵]، آلیاژ آلومینیوم تقویت شده با ذرات سرامیکی را ساختند. آنها مشخصات میکروساختار، خواص مکانیکی و مسائل مربوط به خوردگی را مورد تحقیق و مطالعه قرار دادند. ذرات آلومینا را از ۲ تا ۸ درصد وزنی به آلیاژ آلومینیوم پایه اضافه کردند و بهترین حالت را ۶ درصد وزنی یافتند. در این مقدار درصد وزنی، سختی ۲۶/۳۱ درصد و استحکام نهایی ۲۵/۶۹ درصد نسبت به آلیاژ پایه آلومینیوم افزایش داشته است. کنگ و چن [۶] رفتارهای سختی و کششی کامپوزیت ماتریس آلومینیومی تقویت شده با ذرات نانومتری Al_2O_3 را مورد بحث قرار دادند. بیشترین سختی را در ۴ درصد حجمی از نانو ذرات تقویت کننده یافتند. همچنین شاهد بودند که ذرات نانومتری، خواص مکانیکی را در آلیاژ آلومینیوم بهبود بخشیده است. راجو و همکاران [۷] نانو ذرات Al_2O_3 را با درصدهای وزنی مختلف به آلیاژ آلومینیوم اضافه کردند. این محققین مشاهده کردند که با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده، سختی نمونه‌ها روندی صعودی را طی کرده است. همچنین با اضافه شدن نانو به ماده، استحکام تنش نهایی افزایش پیدا کرده است. درصد وزنی بهینه برای اضافه شدن نانو ذرات به ماتریس آلومینیوم را ۱/۵ یافتند.

بیگی و همکاران [۸]، خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با نانو و میکرو ذرات آلومینای پوشش‌دهی شده و نشده، با درصدهای مختلف وزنی را مورد تحقیق قرار داده‌اند. مشاهده کردند که پوشش‌دهی ذرات آلومینا سبب افزایش ترشوندگی^۱ و کاهش میزان بهم چسبیدگی (اگلومره شدن)^۲ ذرات در آلیاژ آلومینیوم پایه شده است. در کامپوزیت با افزایش درصد وزنی میکرو ذرات تا حدود ۵/۵ درصد تنش تسلیم و استحکام نهایی سیر صعودی داشته و افزایش پیدا کرده است. درصد ازدیاد طول نیز با افزایش درصد وزنی میکرو ذرات پوشش-دهی نشده، سیر نزولی داشته و کاهش یافته است.

در این مقاله، اثر نرخ بارگذاری بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم که در ساخت پیستون موتور خودرو کاربرد دارد، مطالعه شده است. همچنین، اثر افزودن نانو ذرات سیلیکا (یک درصد جرمی)، به منظور

تقویت خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم نیز، بررسی شده است. برای این منظور (مقایسه رفتار آلیاژ آلومینیوم، با و بدون ذرات نانو) از داده‌های آزمون کشش در فرکانس‌های مختلف بارگذاری استفاده شده است.

۲- روش پژوهش

۲-۱- مواد مورد مطالعه

آلیاژ استفاده شده در این مقاله، آلیاژ آلومینیومی با ۱۲/۵ درصد سیلیسیوم می‌باشد. این آلیاژ در نمونه‌های اولیه پیستون یک موتور بنزینی تولید گردید. نوع و درصد عناصر آلیاژ آلومینیوم پیستون با آزمایش کوانتومتری^۳ و با استفاده از استاندارد E1251-11 مشخص شده است [۹] که در جدول ۱ قابل ملاحظه است. بیشترین درصد عنصر برای سیلیسیوم و برابر ۱۲/۵ می باشد [۱۰، ۱۱]. سیلیسیوم منجر به بهبودی شرایط ریخته‌گری شده و همچنین سیالیت، مقاومت در برابر ترک و خاصیت مذاب‌رسانی را ارتقاء می‌دهد. در این پژوهش، نانوذرات سیلیکا یا دی‌اکسید سیلیسیوم (SiO_2) به عنوان ذرات تقویت کننده در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً نانوذرات با اندازه ۳۰ نانومتر [۱۲-۱۳] تهیه شد. برای توزیع مناسب نانو ذرات در حجم مذاب و ریخته‌گری همراه با افزودن ذرات تقویت کننده به آلیاژ پایه، روش‌های مختلفی وجود دارد.

یکی از این روش‌ها، پوشش‌دهی نانو ذرات با پودرهایی می‌باشد که چگالی نانو ذرات را متعادل تر کند. در این پژوهش، برای جلوگیری از بهم چسبیدگی (اگلومره شدن) ذرات نانو و توزیع مناسب آن در محیط مذاب، نانو ذرات SiO_2 با میکرو ذرات آلومینیوم توسط دستگاه آسیاب گلوله‌ای^۴ [۱۴-۱۵]، پوشش‌دهی شدند. اندازه این ذرات حداکثر ۴۵ میکرون و خلوص آن بیشتر از ۹۹ درصد بود. منظور از توزیع مناسب این است که نانو ذرات در سرتاسر حجم مذاب پخش شوند. همچنین، بهم چسبیدگی (اگلومره شدن) نانو ذرات نیز تا جایی قابل قبول است که ابعاد آنها در آلیاژ آلومینیوم پایه از ۱۰۰ نانومتر بیشتر نشود. برای اطمینان از اینکه فرایند انجام شده به درستی صورت گرفته باشد از نانو ذرات سیلیکا پوشش‌دهی شده با ذرات میکرو آلومینیوم، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) گرفته شده که در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. همان طور که مشخص است، نانو ذرات سیلیکا بر روی میکرو ذرات آلومینیوم قرار گرفته‌اند و آن را بطور کامل پوشش‌دهی کرده‌اند.

برای ساخت نمونه‌های استاندارد از جنس آلیاژ آلومینیوم پیستون تقویت شده با نانو ذرات، از ریخته‌گری گردابی [۳، ۱۴، ۱۶ و ۱۷] استفاده گردید. این آلیاژ که بصورت شمش موجود بود، وارد کوره شده و تا دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس [۲، ۱۴، ۱۸ و ۱۹] بالا رفت. سپس نانو ذرات پوشش‌دهی شده را به نسبت یک درصد جرمی [۷ و ۲۰-۲۲] از آلومینیوم مذاب، داخل کاوری از آلومینیوم [۲۳] گذاشته شده و داخل مذاب انداخته شد. ترکیب مذاب و نانو ذرات به مدت دو دقیقه [۲۴] و با هم‌زنی با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه، هم زده شدند تا ذرات نانو در سرتاسر مذاب به درستی پخش شوند. همچنین، قالب برای استفاده و قبل از مذاب ریزی باید پوشش‌دهی و سپس به اندازه کافی

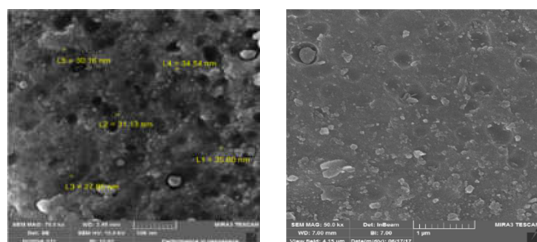
^۳ Quantometry

^۴ Ball mill

^۱ Wettability

^۲ Agglomeration

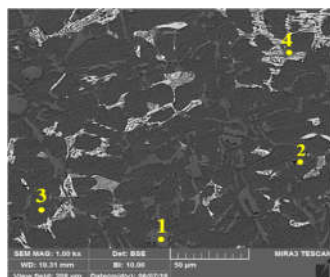
ماده در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. آزمایش XRD از آلیاژ آلومینیوم پیستون انجام شد تا فازها مشخص گردند که در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین، تصاویر میکروسکوپ نوری برای بررسی ریزساختار، از نمونه آلیاژ آلومینیوم پیستون با و بدون نانو، بعد از عملیات متالوگرافی تهیه شد که به ترتیب در اشکال (۵) و (۶) آمده است. فاز پایه، شامل آلومینیوم می‌باشد که با α -Al آن را نشان می‌دهند. فازهای α -Al، AlSi، AlNi، AlCu₃ و Si بر روی تصاویر مشخص شده‌اند [۱۰].



شکل ۲- تصاویر FESEM از آلیاژ آلومینیوم ریخته‌گری شده همراه با نانو ذرات SiO₂

جدول ۲- مواد تشکیل دهنده محلول کالر [۲۷]

نام ماده	مقدار (میلی‌لیتر)
آب مقطر	۱۹۰
نیتریک اسید (HNO ₃)	۵
هیدروکلریک اسید (HCl)	۳
هیدروفلوئوریک اسید (HF)	۲



شکل ۳- تصویر FESEM از ریز ساختار ماده

جدول ۳- نتایج آنالیز EDS

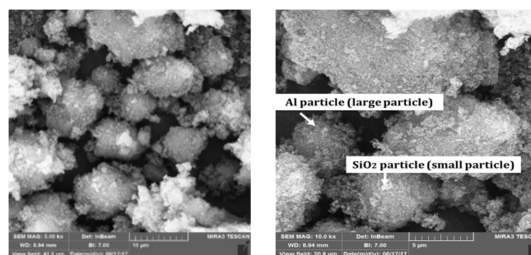
نقطه	درصد وزنی عنصر در آن نقطه					فاز بین‌فازی در بیشترین درصد وزنی
	Mg	Ni	Cu	Si	Al	
۱	۲/۶۲	۹۶/۴۹	۰/۰۰	۰/۸۹	۰/۸۷	AlSi
۲	۸۹/۱۱	۵/۵۱	۰/۵۷	۳/۹۴	۰/۸۷	AlSi/AlNi
۳	۹۶/۹۴	۱/۸۱	۰/۰۰	۱/۲۵	۰/۰۰	AlSi/AlMg
۴	۸۲/۳۴	۸/۲۹	۶/۴۶	۲/۰۹	۰/۸۲	AlSi/AlCu ₃ AlMg

با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان گفت که بعد از افزودن نانو ذرات، سیلیسیوم نانو با سیلیسیوم آلیاژ آلومینیوم پایه ادغام شده و بیشتر مشاهده می‌شود اما ابعاد کریستال‌های سیلیسیوم کاهش یافته است. برای اثبات این ادعا، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، مساحت فاز سیلیسیوم موجود در ریزساختار ماده، اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج نشان

(۱۵۰ درجه سلسیوس) گرم می‌شد. پس از انجام این مراحل، مواد مذاب با بوت به درون قالب ریخته شد. با خارج کردن آن از قالب، به مدت زمان ۲ دقیقه به درون آب با دمای ۶۰ درجه سلسیوس انداخته شدند.

جدول ۱- درصد عناصر آلیاژ آلومینیوم پیستون

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
۱۲/۵	۰/۴۱	۲/۴	۰/۳	۰/۷۴	۰/۰۰۵
Pb	Sn	Sr	V	Na	Bi
۰/۰۱	۰/۰۱	Trace	۰/۰۱	Trace	۰/۰۱
Ni	Zn	Ti	Be	Ca	Li
۲/۲	۰/۰۷	۰/۰۲	Trace	Trace	Trace
Co	Zr	B	Ga	Cd	Al
<۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۱	Base



شکل ۱- تصاویر FESEM از ذرات تقویت‌کننده بعد از عملیات آسیاب

در شرایط مشابه نمونه‌هایی بدون اضافه شدن نانو ذرات ریخته‌گری شدند. در ادامه، برای نمونه‌های ریخته‌گری شده با نانو، برای اطمینان از توزیع مناسب نانو ذرات SiO₂ در سرتاسر آلیاژ آلومینیوم پایه و برای بررسی میزان بهم چسبیدگی (اگلومره شدن) این ذرات، تصاویر FESEM از آن تهیه شده که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. تصاویر گویای آن هست که نانو ذرات SiO₂ در تمام محیط به درستی توزیع شده‌اند. تجمع ذرات نانو نیز در نقاط به نحوی می‌باشد که ابعاد آن از ۱۰۰ نانومتر کمتر است [۲۵]. نقاط سفید رنگ، نانو ذرات سیلیکا هستند.

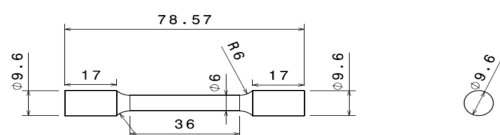
برای مطالعه خواص مکانیکی یا فیزیکی نمونه‌های تولید شده، باید بررسی‌های میکروسکوپی از سطح نمونه صورت گیرد [۸، ۱۰ و ۲۶]. اما در حله اول، نمونه باید آماده‌سازی و متالوگرافی^۱ شود. نمونه مورد نظر برای بررسی ریز ساختار ابتدا سمباده زده شد. بعد از انجام این مرحله، نوبت به پولیش کاری سطح نمونه رسید. به این صورت که نمونه در معرض محلولی متشکل از آلومینا قرار گرفت. در آخر کار، نمونه باید در محلولی حکاکی، قرار می‌گرفت. بنابراین، نمونه در محلولی تحت نام کالر^۲ قرار گرفت تا فرآیند میکرو اچ شدن بر روی آن صورت پذیرد. نیتریک اسید، هیدروکلریک اسید، هیدروفلوئوریک اسید و آب مقطر، تشکیل محلول کالر را می‌داند که در جدول ۲ مقدار هر یک از این مواد آورده شده است [۲۷]. تصاویر FESEM نیز بعد از عملیات متالوگرافی تهیه شده است که در شکل ۳ قابل مشاهده است. نقاط مشخص شده در شکل ۳، تحت آنالیز EDS^۳ قرار گرفتند. درصد عناصر

^۱ Metallography

^۲ Keller

^۳ Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS or EDX)

نمونه قطعه آلیاژ آلومینیوم پیستون، بدون اضافه کردن نانو ذرات و ۹ نمونه قطعه آلیاژ آلومینیوم پیستون با اضافه کردن نانو، با دستگاه آزمون کشش SANTAM STM400 مورد آزمون کشش قرار گرفت. شکل ۸ دستگاه آزمون کشش SANTAM STM400 و قرارگیری نمونه بین دو فک و نصب اکستنسومتر بر روی نمونه را نشان می‌دهد. آزمایشات برای نمونه‌ها در ۴ نرخ مختلف بارگذاری انجام شده و بار دیگر تکرار می‌شد و نمونه‌هایی اضافه برای خطاهای احتمالی نیز در نظر گرفته شدند. مشخصات آزمون‌های کشش نمونه‌های بدون نانو و با نانو، به ترتیب، در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۷- ابعاد نمونه آزمون کشش، طراحی شده برای دستگاه SANTAM STM400



شکل ۸- دستگاه تست کشش SANTAM STM400 و نصب اکستنسومتر بر روی نمونه

جدول ۴- مشخصات آزمون‌های کشش برای نمونه‌های بدون نانو

شماره آزمون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
نرخ کرنش (mm/min)	۰/۱	۰/۱	۱	۱	۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۵- مشخصات آزمون‌های کشش برای نمونه‌های با نانو

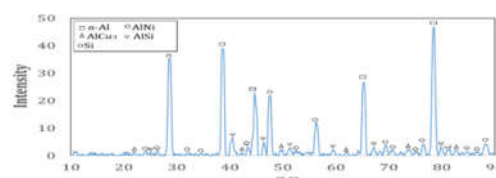
شماره آزمون	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
نرخ کرنش (mm/min)	۰/۱	۰/۱	۱	۱	۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰

نتایج آزمون نمونه‌های بدون نانو و با نانو بطور کامل شرح داده خواهد شد. همچنین، از سطوح شکست نمونه‌های با و بدون نانو، با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)^۲ عکس‌برداری شده است که در ادامه به تحلیل آن پرداخته می‌شود.

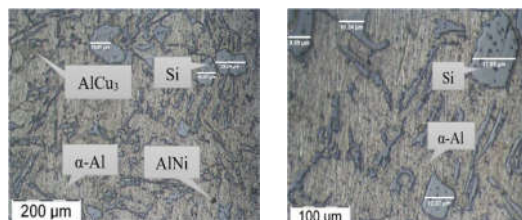
۲-۳- طراحی آزمایش‌ها^۳

برای درک صحیح عکس‌العمل یک خاصیت یا یک رفتار به داده‌های متغیر خروجی یک آزمایش می‌توان از روش تحلیل حساسیت بهره برد که قسمتی از طراحی آزمایش‌ها می‌باشد. با استفاده از تحلیل آماری اعداد و خروجی‌ها تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد. یکی از اصول

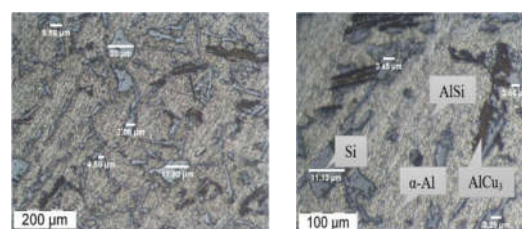
دادند که در ریزساختار ماده با مقیاس ۱۰۰ میکرومتر، مساحت فاز سیلیسیوم از ۷۸۰ میکرومتر مربع در آلیاژ آلومینیوم به ۳۵۵ میکرومتر مربع در نانوکامپوزیت کاهش یافته است. این مقادیر برای ریزساختار ماده با مقیاس ۲۰۰ میکرومتر، به ترتیب برابر با ۸۴۹ میکرومتر مربع و ۶۸۸ میکرومتر مربع است. مقدار گرد بودن فاز سیلیسیوم نیز، از مقدار ۰/۴۱ در آلیاژ آلومینیوم به ۰/۴۸ در نانوکامپوزیت، در ریزساختار ماده با مقیاس ۱۰۰ میکرومتر، افزایش یافته است. این مقادیر برای ریزساختار ماده در مقیاس ۲۰۰ میکرومتر، به ترتیب، برابر با ۰/۴۲ و ۰/۴۵ است. همچنین، شکل فاز بین‌فلزی AlNi بصورت سوزنی شده است. لذا نسبت قطر به طول برای فازهای بین‌فلزی و فاز Si کمتر شده است. این ریز شدن دانه‌ها پس از افزوده شدن نانو ذرات، مشاهده گردید که به دلیل وجود نانو ذرات سیلیسیوم می‌باشد. چنین نتایجی در تحقیقات قبلی [۲۲ و ۲۸] نیز گزارش شده‌اند چراکه نانو ذرات می‌توانند به عنوان جوانه‌زا عمل کنند و باعث کاهش اندازه دانه در ریزساختار ماده شوند.



شکل ۴- آزمایش XRD از آلیاژ آلومینیوم پیستون



شکل ۵- ریزساختار آلیاژ آلومینیوم پیستون بدون نانو ذرات SiO₂



شکل ۶- ریزساختار آلیاژ آلومینیوم پیستون با نانو ذرات SiO₂

۲-۲- آزمون کشش

به منظور بررسی خواص مکانیکی، نمونه‌های آزمون با توجه به استاندارد ASTM-E8M^۱ ساخته شدند. این استاندارد برای تست کشش مواد فلزی استفاده می‌شود. در این استاندارد نمونه‌هایی که دارای سطح مقطعی به شکل دایره‌وار می‌باشند، طول گیج آنها ۵ برابر قطر است [۲۹]. در ادامه کار، نقشه نمونه آزمون کشش، ابتدا با نرم‌افزار Catia طراحی (شکل ۷) و سپس ماشین‌کاری شد. در این پژوهش، ۸

^۲ Field emission scanning electron microscopy

^۳ Design of experiments

^۱ ASTM-E8 standard tensile test specimen

بارگذاری به روش طراحی آزمایش‌ها و با استفاده از نرم‌افزار Minitab انجام گرفته است. و در ادامه با نتایج تجربی و نمودارها مقایسه خواهد شد. براساس نتایج بدست آمده از آنالیز رگرسیون، موارد P-Value و ضرایب تعیین R^2 در جداول ذکر شده است که اثرگذار بودن یا نبودن نرخ بارگذاری بر خواص مکانیکی (استحکام نهایی، استحکام تسلیم، درصد‌ازدیاد طول و مدول الاستیک) را مشخص خواهند کرد. همان طور که اشاره شد اگر P-Value کمتر از ۰/۰۵ باشد، می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور در نظر گرفته شده، پارامتری تاثیرگذار و حساس می‌باشد. ضمناً مقدار R^2 بیان‌کننده آن است که منحنی حاصل از معادله رگرسیونی تا چه اندازه با نقاط روی نمودار انطباق دارد. هر چه مقدار R^2 نزدیک‌تر به ۱ باشد این انطباق بیشتر است. در ضمن بدیهی است که حداکثر مقدار آن برابر ۱ می‌تواند باشد که در این صورت منحنی رگرسیونی صد در صد بر نقاط نمودار منطبق خواهد شد [۳۳]. نتایج آزمون‌های کشش (تنش تسلیم، استحکام نهایی، مدول الاستیک و درصد‌ازدیاد طول نمونه‌ها) در نرخ‌های ۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ (mm/min) در جدول‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای نمونه‌های بدون نانو و با نانو آمده است. با ترسیم مسیر رشد یا روند خطی^۱ درجه سوم، در نمودارهای خواص مکانیکی بر حسب نرخ بارگذاری، معادله رگرسیونی نمودار و در نتیجه مقدار R^2 بدست آمد که با مقدار R^2 بدست آمده از آنالیز حساسیت، مطابقت دارد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت خواص مکانیکی در جداول (۸) و (۹) به ترتیب برای نمونه‌های بدون نانو و با نانو آورده شده است. ستون مربوط به P-Value در جداول نشان دهنده موثر بودن (در ازاء کمتر بودن مقدار آن از عدد ۰/۰۵) و یا موثر نبودن (در ازاء بیشتر بودن مقدار آن از عدد ۰/۰۵) نرخ بارگذاری بر آن خاصیت مکانیکی می‌باشد.

همان طور که در جدول ۸ برای بخش تنش تسلیم نمونه‌های بدون نانو مشاهده می‌شود، P-Value رگرسیون پایین‌تر از ۰/۰۵ و مقدار R^2 بدست آمده نیز ۹۱/۳۲ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار است و صحیح می‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای نرخ بارگذاری درجه یک، دو و سه پایین‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد که به این معنی است که تنش تسلیم به نرخ بارگذاری حساس است. حال که نتیجه گرفته شد که تغییر نرخ بارگذاری بر روی تنش تسلیم اثرگذار است، باید دید که این اثرگذاری به چه نحوی می‌باشد.

پایه‌ای که در این پروژه رعایت شده است، تکرار آزمایش است که ۲ خاصیت مهم را دربر دارد. مورد اول آن که خطای آزمایش را کمتر می‌کند و دیگری آن که اگر از میانگین داده‌های آزمون تکرار شده، استفاده شود می‌توان به نتیجه‌گیری دقیق‌تری رسید. با بدست آوردن میانگین مربعات (MS)، اثر شامل متغیر مدنظر ($MS_{treatment}$) و خطا (MS_{error}) و مقایسه آن با مقدار مرجع ($F_{\alpha, \alpha-1, N-\alpha}$) حساسیت بدست می‌آید [۳۰].

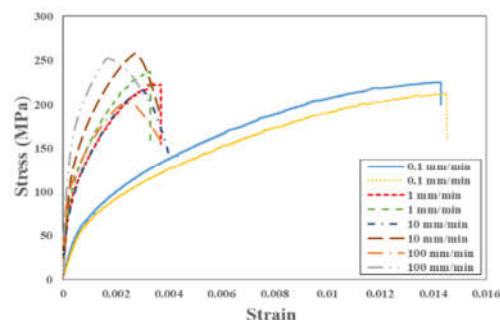
$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (۱)$$

$$F_0 > F_{\alpha, \alpha-1, N-\alpha} \quad (۲)$$

که در آن، $F_{\alpha, \alpha-1, N-\alpha}$ از آمار اعداد خروجی محاسبه می‌شود. همچنین، ضریب اطمینان نیز ۹۵ درصد در نظر گرفته می‌شود و طبیعتاً مقدار خطا و ریسک α برابر ۰/۰۵ خواهد بود [۳۰-۳۲]. $\alpha-1, N-\alpha$ به ترتیب معرف درجه آزادی خطا و اثر، تحلیل حساسیت می‌باشد [۳۱]. اطلاعات کامل و بیشتر در مورد طراحی آزمایش‌ها و تحلیل حساسیت در مرجع [۳۲] آمده است. تحلیل‌های آماری و حساسیت در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار Minitab انجام گرفته است. پارامتر دیگر P-Value است که برای مشخص کردن اثرگذاری عوامل بر رفتاری به کار می‌رود. همان طور که اشاره شد، ریسک α برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود و لذا عاملی اثرگذار است که P-Value آن کمتر از ۰/۰۵ باشد [۳۰-۳۲].

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های بدون نانو در شکل ۹ در قالب نمودار تنش-کرنش آمده است. مواردی از شکل ۹ مشهود است، برای مثال با افزایش نرخ بارگذاری درصد‌ازدیاد طول کاهش یافته است. از این نمودار می‌توان دریافت که با افزایش نرخ بارگذاری شکست‌های رخ داده به سمت تردی بیشتری حرکت کرده‌اند و شکل‌پذیری آنها کاهش یافته است. اما برای تحلیل دقیق‌تر از آنالیز حساسیت استفاده شده که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. این قسمت توسط نرم‌افزار Minitab و با استفاده از روش رگرسیون انجام گرفته است. طراحی آزمایش‌ها بیان می‌دارد که آیا تغییرات عددی خواص مکانیکی، معنادار هستند یا خیر؟ این تاثیر می‌تواند مثبت یا منفی باشد که این موضوع از مشاهده نمودارهای تنش بر حسب کرنش و نمودارهای خواص مکانیکی بر حسب نرخ بارگذاری قابل درک هستند.



شکل ۹- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بدون نانو در نرخ‌های بارگذاری

تحلیل رگرسیون خواص مکانیکی بر حسب نرخ‌های مختلف

^۱ Trend Line

جدول ۶- خواص مکانیکی نمونه‌های بدون نانو و نرخ‌های بارگذاری

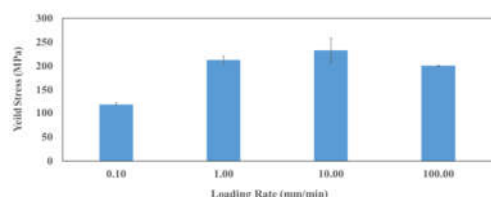
نرخ بارگذاری (mm/min)	۰/۱	۱	۱۰	۱۰۰
تنش تسلیم آزمون اول (MPa)	۱۲۳/۷۲	۲۰۴/۴۶	۲۰۷/۹۱	۲۰۱/۳۰
تنش تسلیم آزمون دوم (MPa)	۱۱۵/۴۳	۲۲۰/۹۷	۲۵۷/۶۷	۲۰۰/۰۰
استحکام نهایی آزمون اول (MPa)	۲۲۵/۳۹	۲۲۳/۵۷	۲۱۶/۴۰	۲۰۱/۹۸
استحکام نهایی آزمون دوم (MPa)	۲۱۳/۲۰	۲۳۷/۹۲	۲۵۸/۷۵	۲۵۱/۹۶
مدول الاستیک آزمون اول (MPa)	۱۰۴/۹۴۶	۴۰۳/۶۳۹	۳۷۹/۲۸۷	۷۹۸/۷۰۶
مدول الاستیک آزمون دوم (MPa)	۸۳/۷۰۲	۴۶۸/۷۴۵	۳۷۷/۳۶۲	۴۳۷/۰۶۲
ازدیاد طول آزمون اول (%)	۱/۴۳	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۲۴
ازدیاد طول آزمون دوم (%)	۱/۴۵	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۱۷

جدول ۷- خواص مکانیکی نمونه‌های با نانو و نرخ‌های بارگذاری

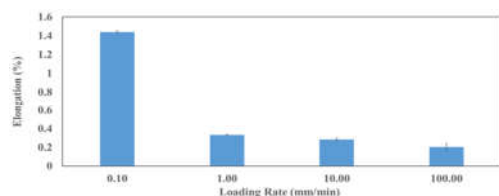
نرخ بارگذاری (mm/min)	۰/۱	۱	۱۰	۱۰۰
تنش تسلیم آزمون اول (MPa)	۱۵۶/۰۰	۲۰۷/۲۳	۱۶۰/۰۹	۱۶۴/۸۴
تنش تسلیم آزمون دوم (MPa)	۱۷۸/۶۹	۱۳۷/۲۱	۱۶۰/۱۰۶۶	۱۷۶/۰۱
استحکام نهایی آزمون اول (MPa)	۱۸۶/۳۱	۲۵۳/۱۶	۲۳۲/۰۵	۱۸۳/۱۹
استحکام نهایی آزمون دوم (MPa)	۲۲۸/۴۷	۲۳۱/۴۹	۲۳۲/۶۵	۱۹۷/۸۸
مدول الاستیک آزمون اول (MPa)	۸۶/۷۷۳	۸۶/۹۶۵	۹۲/۲۹۵	۸۸۴/۴۷۲
مدول الاستیک آزمون دوم (MPa)	۱۰۱/۵۹۵	۱۰۰/۴۶۳	۹۶/۱۳۰	۸۷۶/۰۸۵
ازدیاد طول آزمون اول (%)	۰/۶۰	۰/۷۶	۱/۰۴	۰/۰۵
ازدیاد طول آزمون دوم (%)	۰/۷۲	۱/۳۹	۰/۹۸	۰/۱۷

الاستیک نمونه‌های بدون نانو مشاهده می‌شود. P-Value رگرسیون برای هر دو خاصیت مکانیکی ذکر شده بالاتر از ۰/۰۵ می باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار نیست و صحیح نمی‌باشد. همچنین، مقدار P-Value پارامترهای نرخ بارگذاری درجه یک، دو و سه نیز بالاتر از ۰/۰۵ می‌باشد که به این معنی است که استحکام نهایی و مدول الاستیک، به نرخ بارگذاری در نمونه‌های بدون نانو حساس نیست.

در جدول ۸ برای بخش درصد ازدیاد طول مشاهده می‌شود که مقدار P-Value رگرسیون پایین تر از ۰/۰۵ و برابر صفر می‌باشد و مقدار R^2 بدست آمده نیز ۹۹/۸۷ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون مفهوم دارد و معنادار است. همچنین P-Value پارامترهای نرخ بارگذاری درجه یک، دو و سه پایین‌تر از ۰/۰۵ و برابر صفر می‌باشد که به این معنی است که درصد ازدیاد طول به نرخ بارگذاری حساس است. در ادامه، باید دریافت که این اثرگذاری چگونه است. نمودار ستونی درصد ازدیاد طول بر حسب نرخ بارگذاری در شکل ۱۱ ترسیم شده است.



شکل ۱۰- تنش تسلیم- نرخ بارگذاری برای نمونه‌های بدون نانو



شکل ۱۱- درصد ازدیاد طول- نرخ بارگذاری برای نمونه‌های بدون نانو

با توجه با این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ بارگذاری از ۰/۱ تا ۱۰۰ (mm/min) درصد افزایش طول، مسیر نزولی را طی کرده و کاهش یافته است که با مطالعه مشابهی [۳۷] مطابقت دارد. در بخش تحلیل سطوح شکست نمونه‌ها، می‌توان این مسئله را توجیه نمود که در ادامه و در بخش‌های بعدی نتایج این مقاله، آمده است.

همان طور که در جدول ۹ برای بخش تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌های با نانو مشاهده می‌شود. P-Value رگرسیون برای هر دو خاصیت مکانیکی ذکر شده بالاتر از ۰/۰۵ می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون معنادار نیست و صحیح نمی‌باشد. همچنین P-Value پارامترهای نرخ بارگذاری درجه یک، دو و سه نیز بالاتر از ۰/۰۵ می‌باشد که به این معنی است که استحکام نهایی و تنش تسلیم به نرخ بارگذاری در نمونه‌های با نانو حساس نیست.

برای مدول الاستیک و درصد ازدیاد طول نمونه‌های با نانو در جدول ۹ مشاهده می‌شود که P-Value رگرسیون، پایین‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد که نشان‌دهنده آن است که رگرسیون مفهوم دارد و صحیح می‌باشد. اما با توجه به این که P-Value پارامترهای نرخ بارگذاری درجه

نمودار ستونی تنش تسلیم بر حسب نرخ بارگذاری در شکل ۱۰ ترسیم شده است. با توجه با این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ بارگذاری از ۰/۱ تا ۱۰ (mm/min) تنش تسلیم افزایش داشته است که با مطالعات سایر محققین مطابقت دارد [۳۴-۳۷]. همچنین در بقیه فلزات و یا آلیاژها این ویژگی دیده می‌شود [۳۸-۴۰]. رفتار مواد در نرخ‌های بارگذاری زیاد، تا حدودی قابل پیش‌بینی نیست و زمانی می‌توان کشش مواد در نرخ‌های بارگذاری بالا را مورد بحث و تحلیل قرار داد که تمام نرخ‌های بارگذاری به مراتب بالا (برای مثال ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ mm/min) باشند. همان طور که در نمودار مشهود است، تنش تسلیم در نرخ ۱۰۰ (mm/min) روند کاهشی را به دنبال داشته است. نتیجه‌گیری کلی که با سایر مقالات نیز همخوانی داشته به این صورت می‌باشد که با افزایش نرخ بارگذاری در نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم پیستون بدون نانو، تنش تسلیم افزایش پیدا خواهد کرد.

همان طور که در جدول ۸ برای بخش استحکام نهایی و مدول

جدول ۹- تحلیل رگرسیون برای اثر نرخ بارگذاری بر تنش تسلیم (A)، استحکام نهایی (B)، مدول الاستیک (C) و درصد ازدیاد طول (D)

نمونه‌های با نانو

A				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۹۷۹/۱۰	۳۲۶/۳۷	۰/۴۵	۰/۷۲۹
Loading rate ¹	۲۶/۱۴	۲۶/۱۴	۰/۰۴	۰/۸۵۷
Loading rate ²	۴۸/۱۶	۴۸/۱۶	۰/۰۷	۰/۸۰۷
Loading rate ³	۵۰/۸۴	۵۰/۸۴	۰/۰۷	۰/۸۰۲
ERROR	۳۶۲۸/۳۰	۷۲۵/۶۴	-	-
Total	۴۶۰۷/۳۱	S=۲۶/۹۳۷۷		R ² =۲۱/۲۵%
R ² adjusted = ۰/۰۰%		R ² predicted = ۰/۰۰%		
B				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۳۲۶۲	۱۰۸۷/۴	۴/۰۰	۰/۰۸۵
Loading rate ¹	۱۲۱۸	۱۲۱۷/۷	۴/۴۸	۰/۰۸۸
Loading rate ²	۱۱۸۸	۱۱۸۸/۰	۴/۳۷	۰/۰۹۱
Loading rate ³	۱۱۸۲	۱۱۸۲/۴	۴/۳۵	۰/۰۹۱
ERROR	۱۳۵۸	۲۷۱/۷	-	-
Total	۴۶۲۰	S=۱۶/۴۸۱۸		R ² =۷۰/۶۰%
R ² adjusted = ۵۲/۹۷%		R ² predicted = ۰/۰۰%		
C				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۹/۶۱۶۷۹E+۱۱	۳/۳۰۵۶E+۱۱	۶۵۸۰/۵۹	۰/۰۰۰
Loading rate ¹	۲۱۴۹۸۴	۲۱۴۹۸۴	۰/۰۰	۰/۹۵۰
Loading rate ²	۱۶۵۸۴۰	۱۶۵۸۴۰	۰/۰۰	۰/۹۵۶
Loading rate ³	۶۷۶۴۷	۶۷۶۴۷	۰/۰۰	۰/۹۷۲
ERROR	۲۴۳۵۶۴۳۵۴	۴۸۷۱۲۸۷۱	-	-
Total	۹/۶۱۹۲۲E+۱۱	S=۶۹۷۹/۴۶		R ² =۹۹/۹۷%
R ² adjusted = ۹۹/۹۶%		R ² predicted = ۹۹/۹۰%		
D				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۱/۵۶۱۸	۰/۵۲۰۵۹	۶/۹۲	۰/۰۳۱
Loading rate ¹	۰/۱۶۹۳	۰/۱۶۹۳۹	۲/۲۵	۰/۱۹۴
Loading rate ²	۰/۱۴۷۷	۰/۱۴۷۶۵	۱/۹۶	۰/۲۲۰
Loading rate ³	۰/۱۴۴۹	۰/۱۴۴۹۲	۱/۹۳	۰/۲۲۴
ERROR	۰/۳۷۶۰	۰/۰۷۵۲۱	-	-
Total	۱/۹۳۷۸	S=۰/۲۷۴۲۴۰		R ² =۸۰/۵۹%
R ² adjusted = ۶۸/۹۵%		R ² predicted = ۳۶/۹۲%		

تصاویر FESEM از سطوح شکست نمونه‌های با و بدون نانو در مقیاس ۱۰۰ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر در ۴ نرخ بارگذاری تهیه شده که در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ قابل مشاهده می‌باشند. با بررسی سطوح شکست صفحات کلیویج مشاهده گردید این صفحات نشان‌دهنده آن است که شکست‌های رخ داده از نوع ترد^۱ می‌باشد. همان طور که از اشکال فوق مشخص است در یک مقیاس مشخص اندازه کلیویج با افزودن نانو ذرات به آلیاژ آلومینیوم افزایش، و تعداد آن کاهش پیدا کرده است. بنابراین با افزودن نانو ذرات می‌توان نتیجه گرفت که شکست‌های رخ داده به سمت تردی بیشتر حرکت کرده‌اند. صفحات کلیویج بزرگتر که همراه با تیرریج کمتری می‌باشند، باعث شده است که شکل‌پذیری کمتر شود. بنابراین افزودن ذرات نانو باعث تردی آلیاژ آلومینیوم پایه شده است [۱۰].

هان و همکارانش [۱۰]، نشان دادند که فاز سیلیس در زمینه آلومینیومی، به دلیل تردی و اندازه بزرگ آن، معمولاً تمایل به شکست

یک، دو و سه نیز بالاتر از ۰/۰۵ می‌باشد. لذا مدول الاستیک و درصد ازدیاد طول به نرخ بارگذاری در نمونه‌های با نانو حساس نیست.

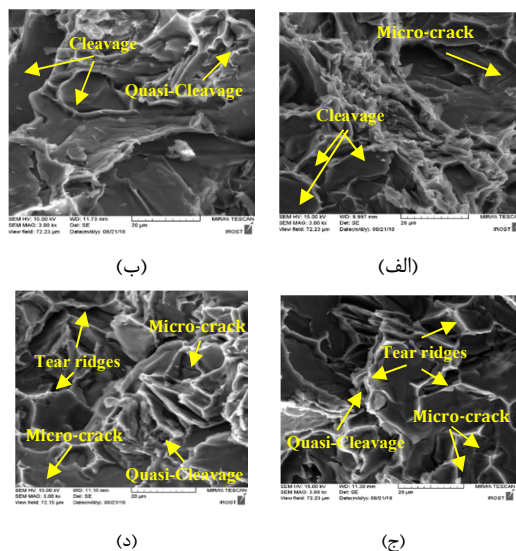
جدول ۸- تحلیل رگرسیون برای اثر نرخ بارگذاری بر تنش تسلیم (A)، استحکام نهایی (B)، مدول الاستیک (C) و درصد ازدیاد طول (D)

نمونه‌های بدون نانو

A				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۱۴۸۲۴	۴۹۴۱/۳	۱۴/۰۲	۰/۰۱۴
Loading rate ¹	۸۵۳۹	۸۵۳۸/۸	۲۴/۲۳	۰/۰۰۸
Loading rate ²	۷۴۷۰	۷۴۷۰/۰	۲۱/۲۰	۰/۰۱۰
Loading rate ³	۷۳۶۳	۷۳۶۲/۸	۲۰/۸۹	۰/۰۱۰
ERROR	۱۴۱۰	۳۵۲/۴	-	-
Total	۱۶۲۳۴	S=۱۸/۷۷۳۲		R ² =۹۱/۳۲%
R ² adjusted = ۸۴/۸۰%		R ² predicted = ۶۵/۲۶%		
B				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۳۴۸/۹	۱۱۶/۳	۰/۲۰	۰/۸۹۱
Loading rate ¹	۱۲۸/۰	۱۲۸/۰	۰/۲۲	۰/۶۶۳
Loading rate ²	۱۰۴/۰	۱۰۴/۲	۰/۱۸	۰/۶۹۴
Loading rate ³	۱۰۱/۸	۱۰۱/۸	۰/۱۸	۰/۶۹۷
ERROR	۲۳۲۳/۰	۵۸۰/۸	-	-
Total	۲۶۷۲/۰	S=۲۴/۰۹۹۰		R ² =۱۳/۰۶%
R ² adjusted = ۰/۰۰%		R ² predicted = ۰/۰۰%		
C				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۲/۸۲۶۹۷E+۱۱	۹۴۲۳۲۴/۱۱۱۴	۵/۵۶	۰/۰۶۵
Loading rate ¹	۱/۱۶۰۲۱E+۱۱	۱/۱۶۰۲۱E+۱۱	۶/۸۵	۰/۰۵۹
Loading rate ²	۱/۰۸۸۱۹E+۱۱	۱/۰۸۸۱۹E+۱۱	۶/۴۳	۰/۰۶۴
Loading rate ³	۱/۰۸۲۰۹E+۱۱	۱/۰۸۲۰۹E+۱۱	۶/۳۹	۰/۰۶۵
ERROR	۶۷۷۴۰۰۹۳۵۶۶	۱۶۹۳۵۰۲۳۳۹۲	-	-
Total	۳/۵۰۴۲۷E+۱۱	S=۱۲۰۱۳۵		R ² =۸۰/۶۷%
R ² adjusted = ۶۶/۱۷%		R ² predicted = ۲۲/۶۸%		
D				
Source	Adj.SS	Adj.MS	F-Value	P-Value
Regression	۲/۰۴۸۰۴	۰/۶۸۲۶۸	۹۸۹/۸۴	۰/۰۰۰
Loading rate ¹	۱/۲۰۶۷۹	۱/۲۰۶۷۹	۱۷۴۹/۷۶	۰/۰۰۰
Loading rate ²	۱/۰۸۹۳۷	۱/۰۸۹۳۷	۱۵۷۹/۵۲	۰/۰۰۰
Loading rate ³	۱/۰۷۷۹۷	۱/۰۷۷۹۷	۱۵۶۲/۹۹	۰/۰۰۰
ERROR	۰/۰۰۲۷۶	۰/۰۰۰۶۹	-	-
Total	۲/۰۵۰۸۰	S=۰/۰۲۶۲۶۱۹		R ² =۹۹/۸۷%
R ² adjusted = ۹۹/۷۶%		R ² predicted = ۹۹/۴۶%		

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات معناداری در خواص مکانیکی مواد مورد مطالعه تحت نرخ‌های مختلف بارگذاری و همچنین، بطور مقایسه‌ای در نمونه‌های با و بدون نانو، حاصل نشده است. البته این مطلب دو استثنا دارد که شامل تنش تسلیم و درصد ازدیاد طول در نمونه‌های بدون نانو ذرات است که به نرخ بارگذاری حساس هستند.

¹ Brittle



شکل ۱۳- تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه‌های بدون نانو در مقیاس ۲۰ میکرومتر: (الف) نرخ ۰/۱ (mm/min)، (ب) نرخ ۱ (mm/min)، (ج) نرخ ۱۰ (mm/min) و (د) نرخ ۱۰۰ (mm/min)

افزایش ابعاد صفحات کلیوچ، ناشی از شکست تردتر است و زمانی رخ می‌دهد که نرخ بارگذاری افزایش یابد. براساس نتایج آزمون کشش، مشخص گردید که با افزایش نرخ بارگذاری، درصد ازدیاد طول کاهش می‌یابد و لذا شکل‌پذیری ماده کاهش می‌یابد. حسین و کارنی^۱ [۳۷] نشان دادند که با افزایش نرخ کرنش، شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم کاهش می‌یابد. آنها مکانیزم‌های شکست را بصورت سه حالت شکست رسوبات، جدایش رسوبات از زمینه و شکست زمینه معرفی کردند. در نرخ کرنش زیاد، رفتار شکست ترد در ماده رخ می‌دهد، چراکه نیرو نمی‌تواند از زمینه آلومینیومی به رسوبات منتقل گردد. بعلاوه، در نرخ کرنش زیاد، جدایش رسوبات از زمینه عامل اصلی شکست در آلیاژهای آلومینیوم است. لذا ماده رفتار تردتری را نشان می‌دهد. این در حالی است که شکست رسوبات به عنوان مکانیزم اصلی آسیب در زمان شکست نمونه، در نرخ کرنش‌های کم معرفی شد و لذا ممکن است رفتار ماده، به سمت شکست نرم سوق داده شود.

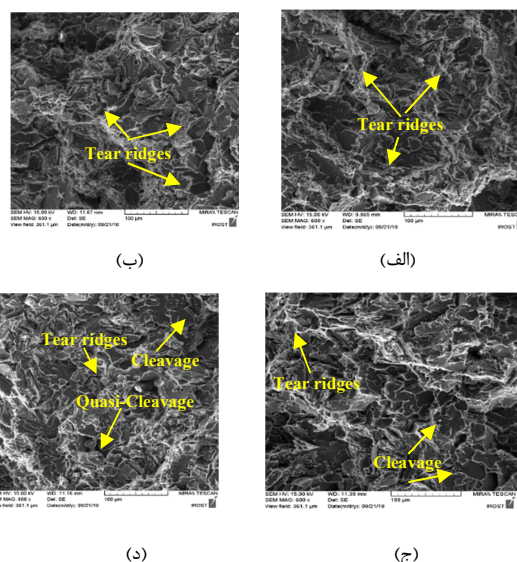
در تمامی تصاویر، موارد دیده شده، کلیوچ بوده و به نظر می‌رسد، دیمپل^۲ وجود ندارد. نواحی دیمپل، نشان‌دهنده شکست نرم می‌باشد. پس می‌توان گفت در تمامی موارد شکست رخ داده، از نوع ترد است. در ضمن با افزودن ذرات نانو، نواحی شبه‌کلیوچ کاهش پیدا کرده است. نواحی شبه‌کلیوچ اغلب با نواحی شبیه به دیمپل همراه است. این موضوع به این معنی می‌باشد که با افزودن نانو ذرات، شکست رخ داده، تردتر می‌شود. چنین نتایجی در تحقیقات قبلی [۱۰] نیز گزارش شده‌اند. همچنین با افزایش نرخ بارگذاری نیز، نواحی شبه‌کلیوچ کاهش یافته است. پس با افزایش نرخ بارگذاری، از نرمی شکست نمونه‌ها کاسته شده و شکست بصورت تردتر می‌شود. چنین نتایجی نیز در تحقیقات قبلی [۳۷ و ۴۰]، ارائه شده است.

¹ Hossain and Kurny

² Dimple

کلیوچ دارد. اما در عین حال، ذرات نانو گاهی می‌توانند هر دو شکست نرم (با آثار دیمپل) و ترد (با آثار کلیوچ) را باعث شوند. برای شکست ترد، دو عامل پدیده جدایش بین ذرات نانو و زمینه آلومینیومی و همچنین، بهم چسبیدگی (اگلومره شدن) ذرات نانو (بصورت محلی)، می‌تواند عامل ایجاد آثار کلیوچ باشد.

همچنین، در قسمت قبلی مشاهده شد که با افزایش نرخ بارگذاری در نمونه‌های بدون نانو، درصد ازدیاد طول کاهش می‌یابد و این خود دلیلی است بر آن که با افزایش نرخ بارگذاری، صفحات کلیوچ افزایش پیدا کند. با مقایسه تصاویر در نرخ‌های مختلف بارگذاری مشاهده می‌شود که افزایش نرخ بارگذاری موجب شده است که لذا تعداد میکروتکرها افزایش پیدا کرده و صفحات کلیوچ بزرگتر شود.



شکل ۱۴- تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه‌های بدون نانو در مقیاس ۱۰۰ میکرومتر: (الف) نرخ ۰/۱ (mm/min)، (ب) نرخ ۱ (mm/min)، (ج) نرخ ۱۰ (mm/min) و (د) نرخ ۱۰۰ (mm/min)

- درصد ازدیاد طول به نرخ بارگذاری حساس بوده و با افزایش نرخ بارگذاری از ۰/۱ تا ۱۰۰ (mm/min) درصد ازدیاد طول ۸۵ درصد کاهش می‌یابد.

با بررسی نتایج آزمون کشش نمونه‌های با نانو، بعد از آنالیز حساسیت موارد زیر مشاهده شد.

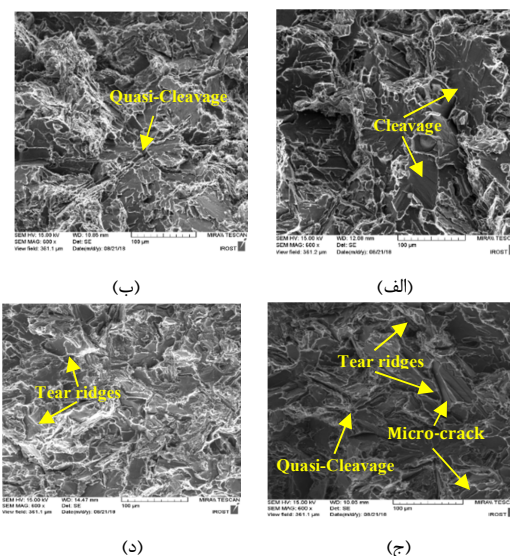
- تنش تسلیم، استحکام نهایی، مدول الاستیک و درصد ازدیاد طول در ماده، به نرخ بارگذاری حساس نبوده و عملاً می‌توان گفت که نرخ بارگذاری بر این نوع نانوکامپوزیت بی‌اثر می‌باشد و با تغییر نرخ بارگذاری، مفهوم معناداری مشاهده نمی‌شود.

تصاویر ریزساختار نشان‌دهنده آن است که نانو ذرات دی‌اکسید سیلیسیوم به سیلیسیوم موجود در زمینه آلیاژ پیوسته است. ذرات نانو افزوده شده نیز موجب شده است که دانه‌ها (کریستال‌های سیلیسیوم) ریزتر شوند. با مشاهده سطوح شکست، صفحات کلیوچ دیده شده است که نشان‌دهنده شکست‌های نوع ترد می‌باشند. در ضمن، با افزودن ذرات نانو، تردی شکست نیز افزایش یافته است. همچنین با افزایش نرخ بارگذاری صفحات کلیوچ بزرگتر شده که نشان می‌دهد با افزایش نرخ بارگذاری شکست‌های رخ داده، تردتر شده‌اند. با افزودن نانو ذرات و افزایش نرخ بارگذاری، نواحی شبه‌کلیوچ نیز کاهش پیدا کرده است. بنابراین دو فاکتور ذکر شده، باعث شده است که از نرمی شکست نمونه‌ها کاسته شده و شکست‌ها تردتر شوند.

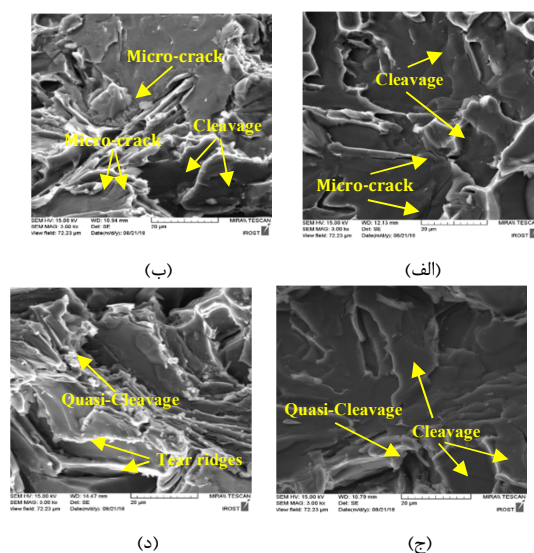
با بررسی نتایج می‌توان مواردی را برای ادامه فعالیت پژوهشی، پیشنهادهایی را ارائه نمود که این پژوهش را تکمیل نماید. به عنوان مثال، می‌توان نوع نانو، نوع ماده پوشش‌دهنده، مدت زمان هم زدن مذاب، درصد وزنی نانو و نوع فرایند ریخته‌گری را تغییر داده، سپس تحت آزمون کشش قرار داد. یا می‌توان عملیات حرارتی را بر روی نمونه‌های آزمون کشش اعمال کرد. انواع رویه عملیات حرارتی می‌تواند انجام شود و مقایسه‌ای صورت گیرد. یا می‌توان نمونه‌ها را در دمای بالا مورد آزمون قرار داد. با توجه به اینکه این نوع آلیاژ، ماده مورد استفاده در پیستون موتور می‌باشد، طبیعتاً دمای کارکردی قطعه، بالاتر از دمای اتاق است.

۵-مراجع

- [1] *Pistons and engine testing*, MAHLE GmbH and Springer, 115-280, 2016.
- [2] Mazahery A. and Shabani M. O. Mechanical Properties of A356 Matrix Composites Reinforced with Nano-SiC Particles. *Strength of Materials*, Vol. 44, No. 6, pp. 686-692, 2012.
- [3] Akbari M. K., Baharvandi H. R. and Shirvanimoghaddam, K. Tensile and Fracture Behavior of Nano/Micro TiB₂ Particle Reinforced Casting A356 Aluminum Alloy Composites. *Materials and Design*, Vol. 1980-2015, No. 66, pp. 150-161, 2015.
- [4] Cavaliere P., Sadeghi B. and Shabani, A. Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites Produced by Spark Plasma Sintering. *Journal of Materials Science*, Vol. 52, No. 14, pp. 8618-8629, 2017.
- [5] Chandrashekar A., Ajaykumar B. S. and Reddappa, H. N. Mechanical, Structural and Corrosion Behavior of AlMg4.5/nano Al₂O₃ Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 1, pp. 2811-2817, 2018.
- [6] Kang Y. C. and Chan, S. L. I. Tensile Properties of Nanometric Al₂O₃ Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 85, No. 2-3, pp. 438-443, 2014.



شکل ۱۴- تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه‌های با نانو در مقیاس ۱۰۰ میکرومتر: (الف) نرخ ۰/۱ (mm/min)، (ب) نرخ ۱ (mm/min)، (ج) نرخ ۱۰ (mm/min) و (د) نرخ ۱۰۰ (mm/min)



شکل ۱۵- تصاویر FESEM از سطح شکست نمونه‌های با نانو در مقیاس ۲۰ میکرومتر: (الف) نرخ ۰/۱ (mm/min)، (ب) نرخ ۱ (mm/min)، (ج) نرخ ۱۰ (mm/min) و (د) نرخ ۱۰۰ (mm/min)

۴- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج آزمون کشش نمونه‌های بدون نانو، بعد از آنالیز حساسیت موارد زیر مشاهده شد.

- تنش تسلیم به نرخ بارگذاری حساس بوده و با افزایش نرخ بارگذاری از ۰/۱ تا ۱۰ (mm/min) تنش تسلیم ۹۴ درصد افزایش می‌یابد اما در نرخ بسیار بالا همچون ۱۰۰ (mm/min)، تنش تسلیم کاهش پیدا کرد.
- استحکام نهایی و مدول الاستیک، به نرخ بارگذاری حساس است.

- Composites. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 518, No. 1-2, pp. 61-64, 2009.
- [24] Soltani S., Khosroshahi R. A., Mousavian R. T., Jiang Z. Y., Boostani A. F. and Brabazon, D. Stir Casting Process for Manufacture of Al-SiC Composites. *Rare Metals*, Vol. 36, No. 7, pp. 581-590, 2017.
- [25] Azadi M., Safarloo S., Loghman F. and Rasouli, R. Microstructural and Thermal Properties of Piston Aluminum Alloy Reinforced by Nano-particles. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1920, No. 1, Article No. 020027, 2018.
- [26] Rincon E., Lopez H. F., Cisneros M. M. and Mancha, H. Temperature Effects on The Tensile Properties of Cast and Heat-Treated Aluminum Alloy A319. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 519, No. 1-2, pp. 128-140, 2009.
- [27] Kieppura R. T. and Sanders, B. R. *ASM handbook: Metallography and microstructures*. ASM International, 1985.
- [28] Issa H. K., Taherizadeh A., Maleki and A., Ghaci, A. Development of An Aluminum/Amorphous Nano-SiO₂ Composite using Powder Metallurgy and Hot Extrusion Processes. *Ceramics International*, Vol. 43, pp. 14582-14592, 2017.
- [29] *Standard test methods for tension testing of metallic materials*, ASTM-E8M-04, ASTM, 2004.
- [30] Azadi M., Izyi M., Marbout A., Azadi M. and Hajiali Mohammadi, A. Optimization of Solution Temperature and Time in Nickel-based Superalloy of Engine Turbo-Charger based on Hardness by Design of Experiment. *The Journal of Engine Research*, Vol. 43, pp. 63-70, 2016.
- [31] Montgomery D. C., *Design and analysis of experiments*. John Wiley and Sons, 2009.
- [32] Azadi M., *Analysis and improvement of a passenger car NVH behavior using DOE method*, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, 2008.
- [33] Azadi M., Alizadeh M. and Sayar H. Sensitivity Analysis for Effects of Displacement Amplitude and Loading Frequency on Low-Cycle Fatigue Lifetime in Carbon/Epoxy Laminated Composites. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 165, Article No. 22021, 2018.
- [34] Li L., Flores-Johnson E. A., Shen L. and Proust, G. Effects of Heat Treatment and Strain Rate on The Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Al Alloy. *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 25, No. 1, pp. 26-41, 2016.
- [35] Higashi K., Mukai T., Kaizu K., Tsuchida S. and Tanimura S. Strain Rate Dependence on Mechanical Properties in Some Commercial Aluminum Alloys. *Le Journal de Physique*, Vol. 1, Article No. 341, 1991.
- [36] Senthil K., Iqbal M. A., Chandel P. S. and Gupta, N. K. Study of The Constitutive Behavior of 7075-T651 Aluminum Alloy. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 108, pp. 171-190, 2017.
- [37] Hossain A. and Kurny A. Effects of Strain Rate on Tensile Properties and Fracture Behavior of Al-Si-Mg Cast Alloys with Cu Contents. *Materials Science and Metallurgy Engineering*, Vol. 1-2, pp. 27-30, 2013.
- [38] Benzing J. T., Poling W. A., Pierce D. T., Bentley J., Findley K. O., Raabe D. and Wittig, J. E. Effects of Strain Rate on Mechanical Properties and Deformation Behavior of An Austenitic Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP-TRIP Steel. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 711, pp. 78-92, 2018.
- [39] Wang W., Ma Y., Yang M., Jiang P., Yuan F. and Wu, X. Strain Rate Effect on Tensile Behavior for A High Specific Strength Steel: From Quasi-Static to Intermediate Strain Rates. *Metals*, Vol. 8, No. 1, Article No. 11, 2017.
- [40] Huang G., Yan B. and Zhu H. The effect of strain rate on tensile properties and fracture strain. In *Great Design in Steel Seminar*, Livonia, 2011.
- [41] Dieter G. E. and Bacon D. J., *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill, 1986.
- [7] Raju P. R. M., Rajesh S., Raju K. S. R. and Raju, V. R. Effect of Reinforcement of Nano Al₂O₃ on Mechanical Properties of Al2024 NMMCs. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, No. 4-5, pp. 3712-3717, 2015.
- [8] Beygi H., Sajjadi S. A. and Zebarjad, S. M. Microstructural Analysis and Mechanical Characterization of Aluminum Matrix Nanocomposites Reinforced with Uncoated and Cu-coated Alumina Particles. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 607, pp. 81-88, 2014.
- [9] *Standard test method for analysis testing of aluminum and aluminum alloys by spark atomic emission spectrometry*, ASTM-E1251-11, ASTM, 2011.
- [10] Han G., Zhang W., Zhang G., Feng Z. and Wang, Y. High-Temperature Mechanical Properties and Fracture Mechanisms of Al-Si Piston Alloy Reinforced with in Situ TiB₂ Particles. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 633, pp. 161-168, 2015.
- [11] El-Labban, H. F., Abdelaziz and M., Mahmoud, E. R. Preparation and Characterization of Squeeze Cast Al-Si Piston Alloy Reinforced by Ni and Nano-Al₂O₃ Particles. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Vol. 28, No. 2, pp. 230-239, 2016.
- [12] Mahboob H., Sajjadi S. A. and Zebarjad, S. M. Influence of Nanosized Al₂O₃ Weight Percentage on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Matrix Nanocomposite. *Powder Metallurgy*, Vol. 54, No. 2, pp. 148-152, 2011.
- [13] Hemanth J. Quartz (SiO₂) Reinforced Chilled Metal Matrix Composite (MMC) for Automotive Applications. *Materials and Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 323-329, 2009.
- [14] Akbari M. K., Mirzaee O., and Baharvandi, H. R. Fabrication and Study on Mechanical Properties and Fracture Behavior of Nanometric Al₂O₃ Particle-Reinforced A356 Composites Focusing on The Parameters of Vortex Method. *Materials and Design*, Vol. 46, pp. 199-205, 2013.
- [15] Su H., Gao W., Feng Z. and Lu, Z. Processing, Microstructure and Tensile Properties of Nano-Sized Al₂O₃ Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Materials and Design*, Vol. 36, pp. 590-596, 2012.
- [16] Velmurugan T., Kumar K. S., Vivek S. and Krishnan G. Y. Nanoparticles Reinforced Aluminum Composites: A Review. *International Journal for Science and Advance Research in Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 5-11, 2017.
- [17] Kandpal B. C. and Singh H. Fabrication and Characterization of Al₂O₃/Aluminum Alloy 6061 Composites Fabricated by Stir Casting. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, pp. 2783-2792, 2017.
- [18] Ezatpour H. R., Sajjadi S. A., Sabzevar M. H. and Huang, Y. Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Al6061-Nanocomposite Fabricated by Stir Casting. *Materials and Design*, Vol. 55, pp. 921-928, 2014.
- [19] Hamedan A. D. and Shahmiri, M. Production of A356-1 wt% SiC Nanocomposite by The Modified Stir Casting Method. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 921-926, 2012.
- [20] Sekar K., Allesu K. and Joseph M. A. Effect of T6 Heat Treatment in The Microstructure and Mechanical Properties of A356 Reinforced with Nano Al₂O₃ Particles by Combination Effect of Stir and Squeeze Casting. *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 444-453, 2014.
- [21] Senthilkumar V., Balaji A. and Ahamed, H. Effect of Secondary Processing and Nanoscale Reinforcement on The Mechanical Properties of Al-TiC Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 10, No. 14, pp. 1293-1306, 2011.
- [22] Azadi M., Zolfaghari M., Rezanezhad S. and Azadi, M. Effects of SiO₂ Nano-particles on Tribological and Mechanical Properties of Aluminum Matrix Composites by Different Dispersion Methods. *Applied Physics: A*, Vol. 124, No. 5, Article No. 377, 2018.
- [23] Mazahery A., Abdizadeh H. and Baharvandi H. R. Development of High-Performance A356/nano-Al₂O₃