



Ferdowsi  
University of  
Mashhad

## Journal of Metallurgical and Materials Engineering


<https://jmme.um.ac.ir/?lang=en>



Iron&Steel  
Society of Iran

### Sensitivity Analysis of Solutioning Time, Ageing Temperature, and Clay Nano-Particles Addition on Hardness of Piston Aluminum-Silicon Alloy using Regression Analysis

Research Article

Hamed Bahmanabadi<sup>1</sup>, Mohammad Azadi<sup>2</sup> 

DOI: 10.22067/jmme.2022.75681.1044

#### Introduction

The piston is one of the most sensitive parts of the vehicle engine, which is under severe thermal and mechanical loads during operation. Due to being in the combustion chamber, contact with the fuel, constant movement in the cylinders, being exposed to high combustion pressure and long working time, the pistons must have proper fatigue, corrosion, and wear properties and also have proper hardness. For this purpose, in order to increase the service lifetime of pistons, it is necessary to improve their mechanical and fatigue properties in different ways, which include modifying the manufacturing approaches, adding elements in micro/nano dimensions to the base alloy, heat treatment, and coating.

By reviewing various articles, it can be found that several researches in the field of investigating the effects of different types of heat-treating, cooling conditions of heat-treating, heat treatments with different temperatures of ageing process, and the simultaneous influence of heat-treating and adding nanoparticles, it has been done on the mechanical properties of aluminum alloys and aluminum-base nanocomposites. However, research on the simultaneous effect of using clay nanoparticles and heat-treating with different temperature and time conditions of solution and ageing processes on the hardness of aluminum-silicon alloys is rarely found, which can be considered as the innovation of this research.

#### Materials and Tests

In this article, the sensitivity analysis of the heat-treating parameters on the hardness of the aluminum-silicon alloys as well as the aluminum-base nanocomposite of the vehicle engine piston has been analyzed. In order to fabricate nanocomposite, 1 wt.% of clay nanoparticles (Montmorillonite K 10) were added to the base alloy by stir-casting technique.

After studying various references and with investigations carried out in the field of industrial application of this alloy, different conditions of solution and ageing were selected for testing. Heat treatments were performed on aluminum-silicon alloys and metal-base nanocomposites, including 1, 3 and 5 hours of solution at 500°C and cooling in water and then, 6 hours of ageing at 200, 215 and 230°C. After heat treatments with different solution and ageing conditions, the samples were subjected to the hardness test. It is worth mentioning that the hardness test was performed using the KOOPA Universal Hardness Tester UV1 model and the Vickers method on the samples. In order to ensure the accuracy of the obtained results, the experiments were done three times on each sample for repeatability.

Finally, after extracting hardness data, regression modeling was done to analyze the sensitivity analysis of input parameters on the output.

#### Results and Conclusions

The summary of the results in this research is as follows,

- The hardness of the base alloy increased after adding nanoparticles and performing the heat treatment process.
- The solution time alone had no significant effect on the hardness of the aluminum alloy.
- Increasing the temperature of the ageing process decreased the hardness of the alloy.
- The addition of nanoparticles caused a slight increase in hardness.
- Heat treatments and the addition of nanoparticles caused the spheroidization of silicon particles in the microstructure of the material and, as a result, increased the hardness of the alloy.
- The hardness of both samples reached its highest value during the solution process with a time of 5

\*Manuscript received: March 6, 2022, Revised, October 12, 2022, Accepted, December 25, 2022.

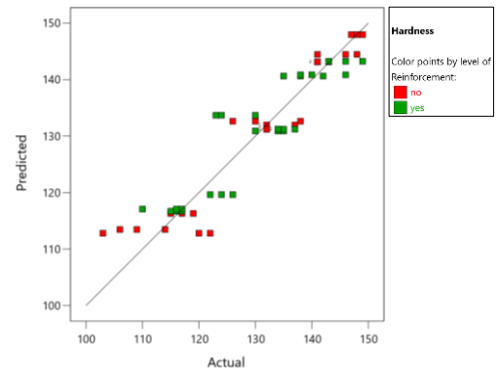
<sup>1</sup> Master of Science, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

<sup>2</sup> Corresponding author: Associated Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Email: m\_azadi@semnan.ac.ir

hours and the ageing process with a temperature of 200°C. Based on this issue, the maximum hardness for the aluminum alloy and the metal-base nanocomposite during heat-treating with the above conditions was equal to 148 and 146 Vickers, respectively.

- A good agreement between the experimental results of hardness measurements and the theoretical results obtained from the regression model was observed. Therefore, the average value and the maximum relative error resulting from the difference between the experimental results and the theoretical data were equal to 2.61 and 9.52%, respectively (Figure 1).



**Figure 1- The scatter-band of experimental and theoretical hardness data for samples with and without clay nanoparticles**



## تحلیل حساسیت زمان انحلال، دمای پیرسازی و افزودن نانوذرات خاک رس بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم

### پیستون به روش آنالیز رگرسیون\*

مقاله پژوهشی

محمد آزادی<sup>(۱)</sup>  حامد بهمن آبادی<sup>(۲)</sup>

DOI: 10.22067/jmme.2022.75681.1044

**چکیده** در این مقاله، به تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی شامل زمان انحلال، دمای پیرسازی و نیز افزودن نانوذرات بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم ( $AlSi12CuNiMg$ ) پیستون موتور خودرو به روش آنالیز رگرسیون پرداخته شده است. بدین منظور، از نانوذرات خاک رس به مقدار ۱ درصد وزنی جهت ساخت نانوکامپوزیت پایه فلزی، استفاده شده و نمونه‌های استاندارد، با روش ریخته‌گری گردابی و گرانشی ساخته شدند. به منظور یافتن شرایط بهینه عملیات حرارتی جهت دستیابی به بیشترین مقدار سختی، فرآیند انحلال با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱، ۳ و ۵ ساعت و نیز فرآیند پیرسازی با دماهای ۲۰۰، ۲۱۵ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت بر روی آلیاژ پایه و نیز نانوکامپوزیت پایه فلزی، اعمال گردید. نتایج تجربی نشان داد که دمای پیرسازی، پارامتری با بیشترین تأثیر و زمان انحلال و نیز افزودن نانوذرات، پارامترهایی با کمترین میزان تأثیر بر سختی آلیاژ بوده‌اند. همچنین، زمان ۵ ساعت برای فرآیند انحلال و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فرآیند پیرسازی، شرایط بهینه برای عملیات حرارتی بوده و موجب دستیابی به بیشترین میزان سختی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، آنالیز رگرسیون، پیستون موتور، عملیات حرارتی، نانوذرات رس.

## Sensitivity Analysis of Solutioning Time, Ageing Temperature, and Clay Nano-Particles Addition on Hardness of Piston Aluminum-Silicon Alloy using Regression Analysis

Hamed Bahmanabadi

Mohammad Azadi

### Abstract

In this article, the sensitivity analysis of heat treatment parameters including the solutioning time, ageing temperature, and addition of nano-particles on the hardness of the piston aluminum-silicon alloy ( $AlSi12CuNiMg$ ) were characterized using regression analysis method. For such an objective, the clay nano-particles with 1 wt.% were used to fabricate the metal-matrix nano-composites and the standard specimens were produced using the gravity and stir-casting methods. To find the superior heat treatment conditions for aiming the maximum hardness, the solution treatment was performed at 500°C for 1, 3, and 5 hours and the ageing treatment was done at 200, 215, and 230°C for 6 hours on the base alloy and the metal-matrix nano-composites. Experimental results showed that the ageing treatment had the most effect on the material hardness and the solutioning time and nano-particles addition were the less effective parameters on the alloy hardness. The optimum heat treatment conditions achieved by the solutioning time of 5 hours and the ageing temperature of 200 °C, during heat-treating which led to have the maximum hardness.

**Key Words:** Aluminum-silicon alloy, Regression analysis, Engine piston, Heat treatment, Clay nano-particles

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۲/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۱۰/۰۴ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان.

## مقدمه

پیستون، یکی از حساس‌ترین قطعات موتور خودرو است که در زمان عملکرد، تحت بارهای حرارتی و مکانیکی شدیدی قرار دارد [1]. با توجه به نیروهای تراکمی و انبساطی ناشی از احتراق، تا ۱۸۰۰۰ نیوتن نیرو به پیستون وارد می‌شود که در هنگام رانندگی با سرعت زیاد، این اتفاق در هر سیلندر، سی تا چهل بار در ثانیه رخ می‌دهد [2]. پیستون‌ها به دلیل قرار داشتن در محفظه احتراق، تماس با سوخت، حرکت دائمی در سیلندرها، قرار داشتن در معرض فشار زیاد احتراق و زمان کارکرد بالا، باید خواص خستگی، خوردگی و سایشی مناسبی داشته و از سختی مناسبی نیز برخوردار باشند [3]. بدین منظور، به جهت افزایش عمر پیستون‌ها، باید خواص مکانیکی و خستگی آن‌ها را به شیوه‌های مختلف بهبود بخشید که از جمله آن‌ها می‌توان به اصلاح روش‌های ساخت، افزودن عناصر در ابعاد میکرو و نانو به آلیاژ پایه، عملیات حرارتی و نیز پوشش‌دهی اشاره نمود. در ادامه، به طور اجمالی به ارائه برخی از پژوهش‌ها در زمینه بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم، پرداخته شده است.

محمدمدی گنگرج و همکاران [4]، اثر عملیات حرارتی و شرایط خنک‌سازی را بر فرآیند اصطکاکی کامپوزیت پایه-آلومینیومی A390 حاوی مقدار ۱۰ درصد وزنی SiC، مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج، افزودن ذرات تقویتی SiC و نیز اجرای عملیات حرارتی سه‌مرحله‌ای، موجب افزایش تنش کششی نهایی و سختی آلیاژ A390 گردید. آلفونز (Alphonse) و همکاران [5]، به مطالعه اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم AA2219 فورج‌شده، پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی در نتیجه عملیات حرارتی افزایش یافته و نیز افزایش دمای پیرسازی موجب افزایش مقاومت کششی آلیاژ گردیده است. آزادی و همکاران [6]، به بررسی اثر عملیات حرارتی با فرآیندهای پیرسازی متفاوت، بر ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیوم پیستون پرداختند. نتایج نشان داد که ۷ ساعت انحلال در دمای ۵۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۷ ساعت پیرسازی در دمای ۲۰۵ درجه سانتی‌گراد، موجب افزایش سختی آلیاژ پیستون تا مقدار بیشینه خود یعنی ۱۵۳ برینل گردید. راجکرتی (Rajkeerthi) و همکاران [7]، به ارزیابی اثر عملیات حرارتی بر مقاومت کامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم پرداختند. براساس نتایج ارائه‌شده، عملیات حرارتی، موجب بهبود خواص کششی، فشاری

و سختی این آلیاژ گردید. سفرالی و همکاران [8]، اثر عملیات حرارتی T4 و T6 را به ترتیب بر خواص اتصالی آلیاژهای دارای جوش اصطکاکی آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ بررسی نمودند. نتایج حاکی از بهبود خواص مکانیکی هردو آلیاژ و بهبود چشمگیر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در نتیجه عملیات حرارتی T6 بود. یوان و همکاران [9]، به پژوهش بر روی اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی کامپوزیت پایه آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات آلیاژی انتروپی بالا پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که سختی و مدول الاستیسیته کامپوزیت، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. پاداپ (Padap) و همکاران [10]، اثر فرآیند پیرسازی و فشار تک‌محوره را بر خواص دمایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، مورد بررسی قرار دادند. افزایش سختی، بهبود خواص رسانایی گرمایی و ضریب انبساط حرارتی، از جمله نتایج به‌دست‌آمده در نتیجه عملیات حرارتی اجراشده بود. آزادی و همکاران [11]، به بررسی اثر عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات رس بر خواص کششی و خستگی کم‌چرخه آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم پیستون موتور خودرو در دمای بالا پرداختند. براساس نتایج، تغییرات چشمگیری در خواص مکانیکی آلیاژ تقویت‌شده با نانوذرات و عملیات حرارتی شامل تنش کششی نهایی، تنش تسلیم و مدول الاستیسیته مشاهده نشده و فقط تغییر طول نمونه تقویت‌شده، افزایش یافت. یی (Yi) و همکاران [12]، به تحقیق در مورد اثر عملیات حرارتی T6 پس از جوش کاری، بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش کاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، پرداختند. آنان دریافتند که ریزساختار نسبت به زمان و دمای عملیات حرارتی حساس بوده و نیز افزایش دما، یک عامل مفید در راستای کاهش زمان پیرسازی بوده است. آزادی و همکاران [13]، خواص فشاری و سایشی آلیاژ تقویت‌شده آلومینیوم با نانوذرات سیلیسیم اکسید را پس از عملیات حرارتی، بررسی نمودند. نتایج آزمون سایش نشان داد که نرخ سایش نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه، کمتر بوده و نیز مدول الاستیسیته آلیاژ در نتیجه افزودن نانوذرات، افزایش یافته است. پراکاش (Prakash) و همکاران [14]، به پژوهش در مورد اثر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ جوش کاری‌شده، پرداختند. براساس نتایج، خواص کششی و سختی این آلیاژ، در نتیجه عملیات حرارتی، بهبود یافت. آزادی و همکاران [15]، اثر عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات رس را بر خواص مکانیکی

آزمون‌های مختلف را تعیین نمود. روش مورداستفاده در این پژوهش، تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل‌های آماری است. در این روش، ابتدا باید میانگین مربعات اثر شامل متغیر مدنظر ( $MS_{\text{treatment}}$ ) و خطا ( $MS_{\text{error}}$ ) اندازه‌گیری شود. هدف نهایی در این روش، به‌دست آوردن حساسیت اثر باتوجه‌به روابط (۱) و (۲) است. در نهایت، مقدار به‌دست‌آمده با مقدار مرجع ( $F_{a,a-1,N-a}$ ) مقایسه می‌گردد [17].

$$F_0 = \frac{MS_{\text{treatment}}}{MS_{\text{error}}} \quad (1)$$

$$F_0 > F_{a,a-1,N-a} \quad (2)$$

برای مشخص شدن مقدار  $F_{a,a-1,N-a}$  باید از جدول‌های آماری استفاده شود. در این پژوهش، مقدار سطح ریسک  $a$  برابر با ۰,۰۵ و ضریب اطمینان طراحی آزمون‌ها برابر با ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. مقادیر  $a-1$  و  $N-a$  نیز نشان‌دهنده درجه آزادی اثر و خطا هستند. روابط (۱) و (۲) برای یک اثر، قابل اجرا هستند. شایان ذکر است که این روابط، قابلیت گسترش برای بررسی چندین اثر را دارند [17]. در این پژوهش، کلیه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری Design-Expert انجام شده است. پس از تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل رگرسیون، مطابق رابطه (۳)، تابعی براساس متغیرهای مدنظر ( $P_1, P_2, \dots$ ) برای تخمین میزان سختی ارائه شده است.

$$H = C_0 + C_1P_1 + C_2P_2 + C_3P_1P_2 + \dots \quad (3)$$

پس از تطبیق رابطه فوق با نتایج تجربی به‌دست‌آمده، ضرایب رابطه (۳) شامل  $C_0, C_1, \dots$  به‌دست خواهند آمد. در این مقاله، ضریب ثابت، توان اول و دوم و نیز اثرات متقابل آن‌ها، در نظر گرفته شده است.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که در تحلیل رگرسیون، اثرگذاری یا عدم اثرگذاری هر پارامتر، با P-value و نیز میزان اثرگذاری هر پارامتر، با F-value تعیین می‌شود. اگر مقدار P-value کمتر از ۰,۰۵ باشد، پارامتر موردنظر، اثرگذار بوده و اگر مقدار آن بیشتر از ۰,۰۵ باشد، پارامتر، بی‌اثر خواهد بود [18]. شایان ذکر است که مقادیر بزرگتر برای F-value بیانگر میزان اثرگذاری بیشتر پارامتر موردنظر است.

### مواد و آزمون‌ها

در این مقاله، به تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم پیستون موتور خودرو، پرداخته شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم مورداستفاده، در جدول (۱) ارائه شده

و رفتار خستگی کم‌چرخه تنش-کنترل آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، بررسی کردند. نتایج، عدم تأثیر مثبت نانوذرات رس و عملیات حرارتی را بر خواص مکانیکی آلیاژ، نشان داد. شریفی و همکاران [16]، به تحلیل حساسیت متغیرهای عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سرسیلندر، به‌روش رگرسیون، پرداختند. نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که زمان پیرسازی مؤثرتر از دما بوده و دمای انحلال عامل مهم‌تری نسبت به دمای پیرسازی در تغییرات سختی بوده است.

با بررسی مقالات مختلف، می‌توان دریافت که پژوهش‌های بسیاری در زمینه بررسی اثر انواع مختلف عملیات حرارتی، اثر شرایط خنک‌سازی عملیات حرارتی، اثر عملیات حرارتی با دماهای مختلف فرآیند پیرسازی و اثر هم‌زمان عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات، بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم انجام شده است. اما پژوهش در زمینه بررسی اثر هم‌زمان استفاده از نانوذرات رس و نیز عملیات حرارتی با شرایط مختلف دمایی و زمانی فرآیندهای انحلال و پیرسازی بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، به‌ندرت یافت می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان نوآوری این پژوهش، یاد نمود.

در این پژوهش، به‌منظور بررسی شرایط مختلف عملیات حرارتی T6 و اثرات آن بر سختی آلیاژ آلومینیوم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم، از تحلیل حساسیت به‌روش رگرسیون استفاده شده است. تحلیل رگرسیون شامل روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی توابع هدف براساس متغیرهای ورودی است. در این روش، متغیرها می‌توانند به‌صورت متغیرهای خاص و منحصر‌به‌فرد یا به‌صورت متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل تعریف شوند. تحلیل رگرسیون، به‌طور ویژه مشخص می‌کند که هر متغیر چگونه و به چه میزان در تابع هدف اثرگذار است. همچنین، تغییر یکی از متغیرها چه اثری و با چه مقدار بر متغیرهای دیگر داشته و این تغییر چه تأثیری بر تابع هدف نهایی خواهد داشت. تحلیل رگرسیون، توانایی مناسبی در ارائه پیش‌بینی از رفتار ماده دارد [17]. پس از به‌دست آوردن اطلاعات حاصل از آزمون‌های تجربی، تحلیل صحیح و استفاده مناسب از نتایج به‌دست‌آمده، از مهمترین بخش‌های پژوهش است. با روش طراحی آزمون‌ها، می‌توان به میزان تأثیر هر یک از متغیرها بر نتیجه آزمون دست یافت. همچنین، به‌کمک این روش، می‌توان حالت‌های بهینه

جزئیات بیشتر در مورد نحوه ساخت نمونه‌ها، در پژوهش پیشین [19] ارائه شده است. شکل (۱)، تصویر میکروسوپ الکترونی نشر میدانی و طیف نمایی اشعه ایکس را از سطح آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم نشان می‌دهد.

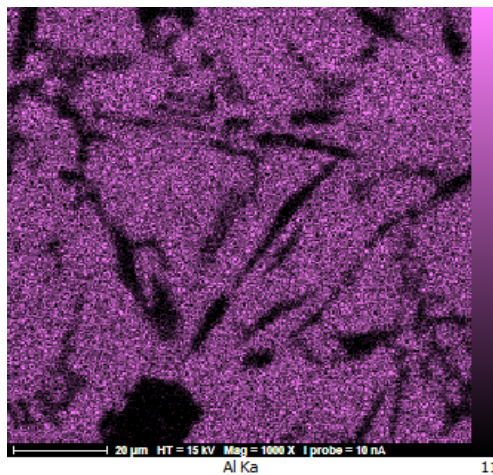
است. به منظور ساخت نانوکامپوزیت پایه فلزی آلومینیوم، مقدار ۱ درصد وزنی نانوذرات رس (Montmorillonite K 10) با روش ریخته‌گری گردابی، به آلیاژ پایه افزوده شد. ترکیب شیمیایی نانوذرات رس مورد استفاده در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم مورد استفاده

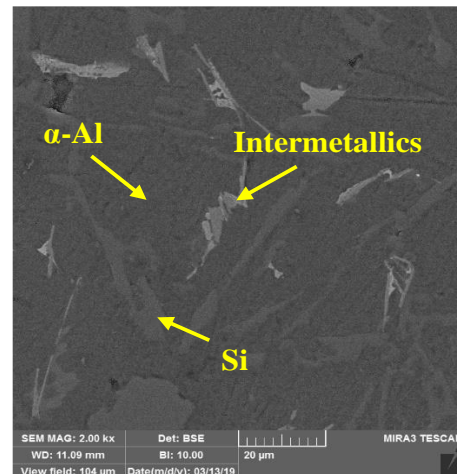
عنصر	آلومینیوم	سیلیسیم	مس	منیزیم	نیکل	آهن	روی	منگنز
مقدار (درصد وزنی)	۸۳,۳۰	۱۲,۷۰	۱,۱۶	۱,۰۰	۰,۸۰	۰,۵۶	۰,۱۶	۰,۱۲

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نانوذرات رس مورد استفاده

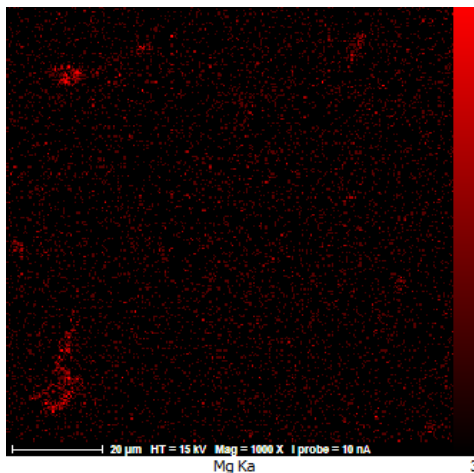
ترکیب	سیلیسیم اکسید	آلومینیوم اکسید	آهن اکسید	منیزیم اکسید	کلسیم اکسید	سدیم اکسید	پتاسیم اکسید	تیتانیم اکسید	سایر
مقدار (درصد)	۵۰,۹۵	۱۹,۶۰	۵,۶۲	۳,۲۹	۱,۹۷	۰,۹۸	۰,۸۶	۰,۶۲	۱۵,۴۵



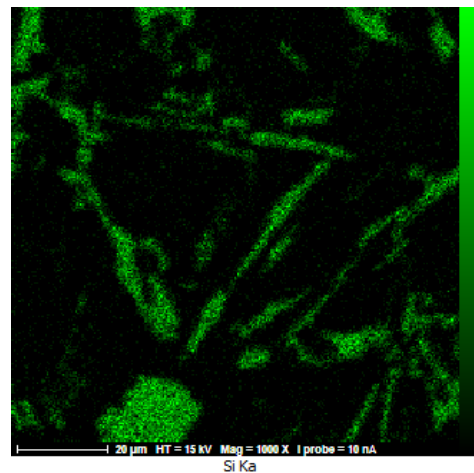
(ب)



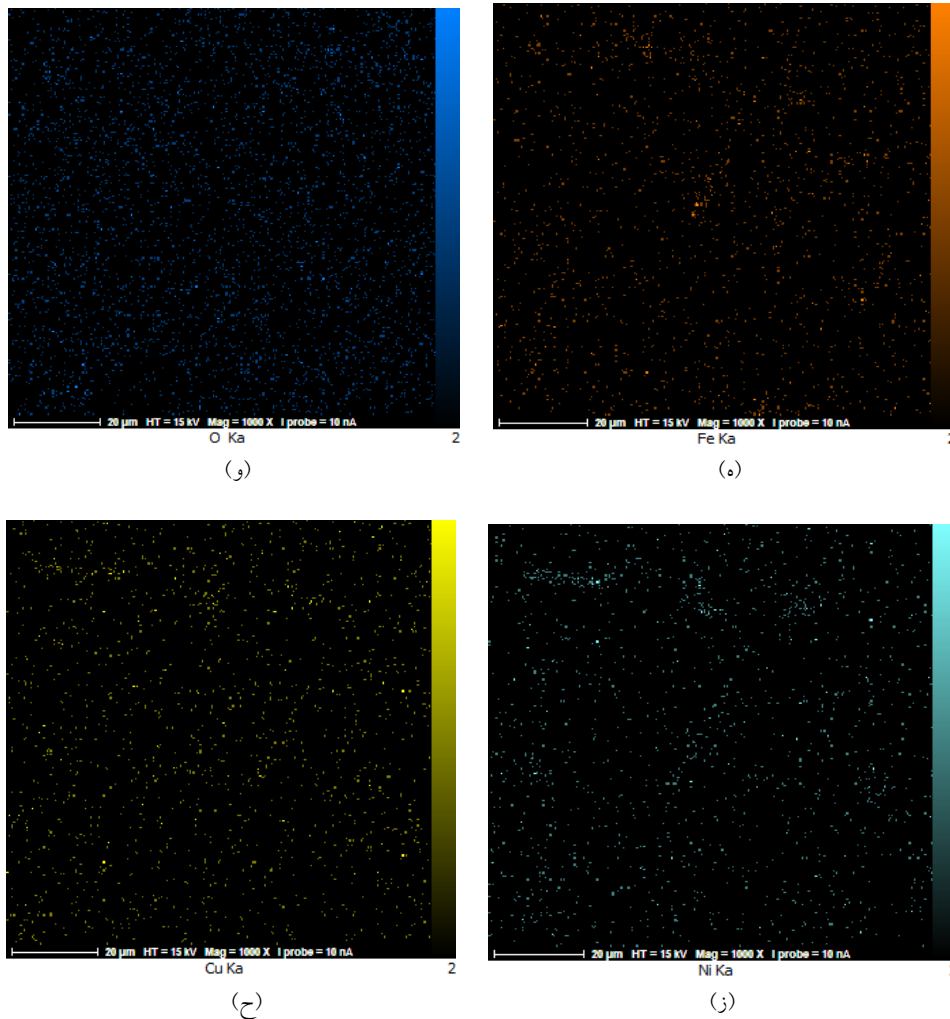
(الف)



(د)



(ج)



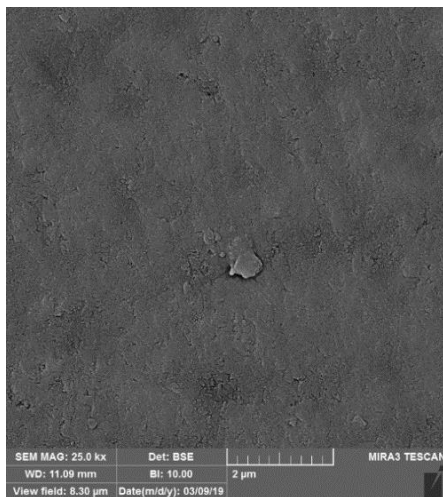
شکل ۱ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی از سطح آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم، (ب) توزیع عنصر آلومینیوم، (ج) توزیع عنصر سیلیسیم، (د) توزیع عنصر منیزیم، (ه) توزیع عنصر آهن، (و) توزیع عنصر اکسیژن، (ز) توزیع عنصر نیکل و (ح) توزیع عنصر مس

اتصال ذرات بین فلزی به فاز زمینه به دلیل مکانیزم مقاومتی، برای خواص مکانیکی یک مزیت محسوب می شود [22]. ذرات سیلیسیم و نیز ذرات بین فلزی دارای مدول الاستیسیته و سختی بالاتری هستند که تأثیر چشمگیری بر خواص مکانیکی مخصوصاً در دماهای بالا دارند [23,24]. ذرات بین فلزی به دلیل پایداری دمایی و خواص مکانیکی مناسب تر، اثر بیشتری بر خواص دما بالای آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم پیستون دارند [25,26]. تغییر اندازه و مورفولوژی سیلیسیم یوتکتیک، اثر چشمگیری بر خواص مکانیکی دارد [22]. وجود عنصر نیکل در فاز بین فلزی سبب افزایش سختی آلیاژ می گردد [27]. افزایش سختی آلیاژ در نتیجه افزایش مقادیر سیلیسیم و نیکل در آلیاژ به دلیل بیشتر بودن تنش تسلیم نیکل در فاز بین فلزی است [27]. به طور کل، وجود عنصر نیکل در آلیاژ ریختگی آلومینیوم- سیلیسیم با مقادیر بالای

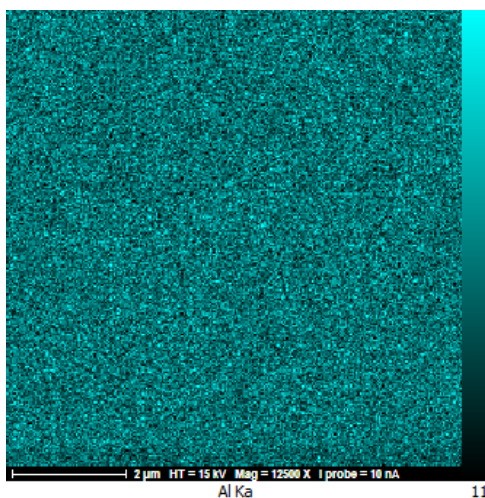
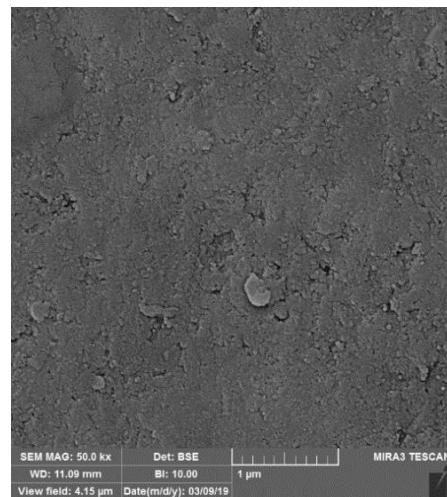
به منظور بررسی اثر توزیع یکنواخت و عدم انباشتگی نانوذرات رس در سطح نمونه، تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی و طیف نمایی اشعه ایکس از سطح نانوکامپوزیت پایه فلزی آلومینیوم نیز در شکل (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است که به منظور افزایش وضوح تصویر، سطح نمونه با لایه‌ای از طلا به ضخامت ۲۰ میکرومتر، پوشش داده شده است. در شکل (۱) و (۲)، فاز زمینه (آلومینیوم)، ذرات سیلیسیم و نیز ذرات بین فلزی شامل عناصر منیزیم، نیکل، آهن، منگنز، روی و مس قابل مشاهده است [19]. همچنین، واضح است که در سطح نانوکامپوزیت پایه فلزی، اثری از انباشتگی نانوذرات وجود نداشته و در نتیجه، توزیع، یکنواخت بوده است. وجود ذرات بین فلزی شامل عناصر سیلیسیم، آهن، مس و نیکل، موجب بهبود خواص مکانیکی آلیاژ علی‌الخصوص در دماهای بالا می گردد [20,21].

در دماهای ۲۰۰، ۲۱۵ و ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی در هوا بوده است. براساس نتایج ارائه شده در مرجع [38]، دمای خنک‌سازی و زمان پیرسازی، اثر چشمگیری بر سختی ندارند. عملیات حرارتی، معمولاً موجب افزایش کرنش شکست نمونه و نیز تغییر در شکل و اندازه ذرات بین‌فلزی می‌شود [38,39]. عملیات حرارتی T6، موجب بهبود ریزساختار، افزایش مقاومت کششی و عمر خستگی دما بالای آلیاژ آلومینیوم می‌گردد [40]. براساس گزارش‌های ارائه شده در مرجع [41]، مواد پس از عملیات حرارتی T6، سختی بیشتری نسبت به سایر عملیات حرارتی (T4، T5، T7، T8 و T9) داشته‌اند. پس از اجرای عملیات حرارتی با شرایط مختلف انحلال و پیرسازی، نمونه‌ها تحت آزمون سختی سنجی قرار گرفتند.

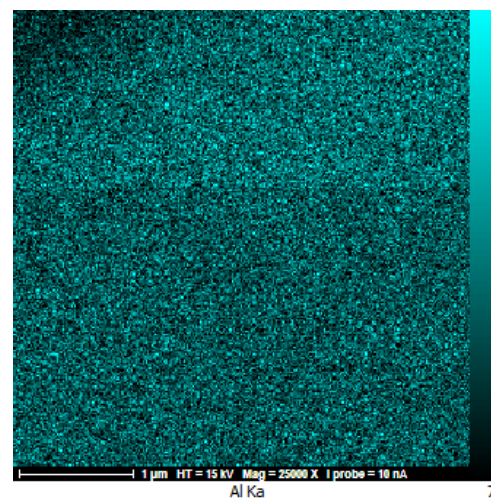
آهن، موجب بهبود خواص مکانیکی می‌گردد [27]. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، به منظور اجرای فرآیندهای عملیات حرارتی، قطعات کوچکی از استوانه ریخته‌گری شده، برش خورده و آماده اجرای فرآیند شد. شکل (۳)، مراحل مختلف ساخت تا سختی-سنجی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. باتوجه به اینکه عملیات حرارتی T6 موجب افزایش سختی آلیاژ آلومینیوم می‌شود [28]، در این پژوهش پس از مطالعه مراجع مختلف [29-37]، [6] و با بررسی-های صورت گرفته در زمینه کاربرد صنعتی این آلیاژ، شرایط مختلفی از انحلال و پیرسازی جهت آزمایش، انتخاب گردید که جزئیات آن، در جدول (۳)، ارائه شده است. شایان ذکر است که عملیات حرارتی اجرا شده بر روی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه فلزی، شامل ۱، ۳ و ۵ ساعت انحلال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی در آب و ۶ ساعت پیرسازی



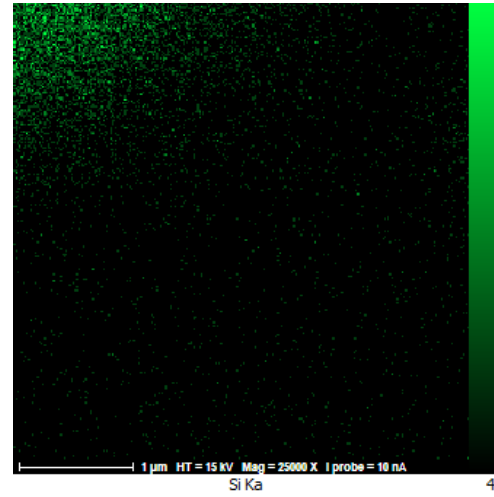
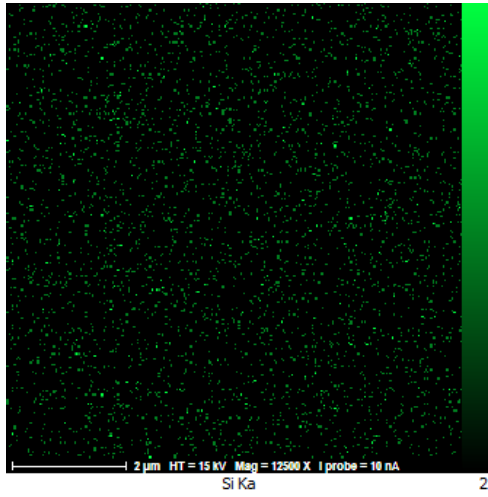
(الف)



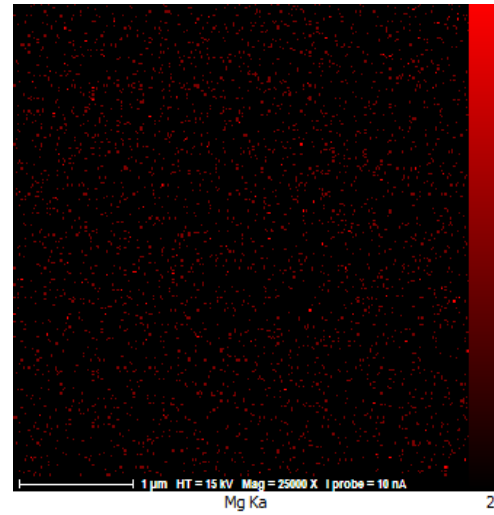
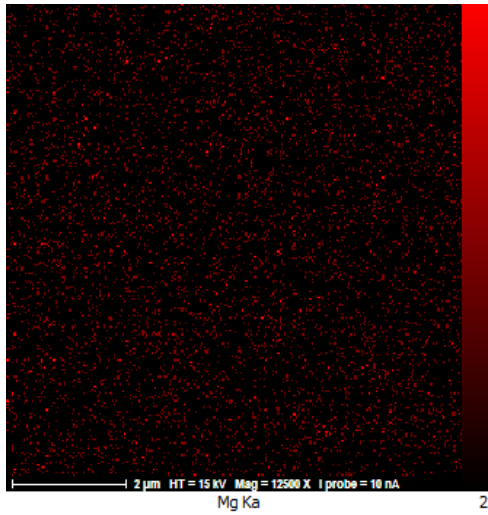
(ب)



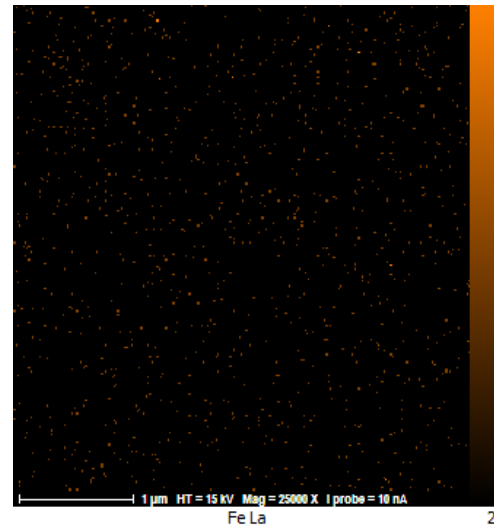
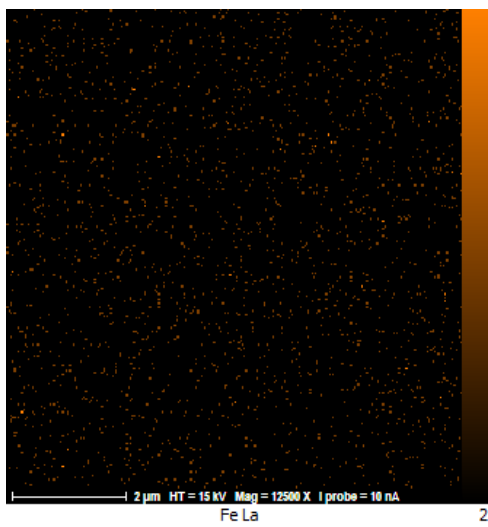




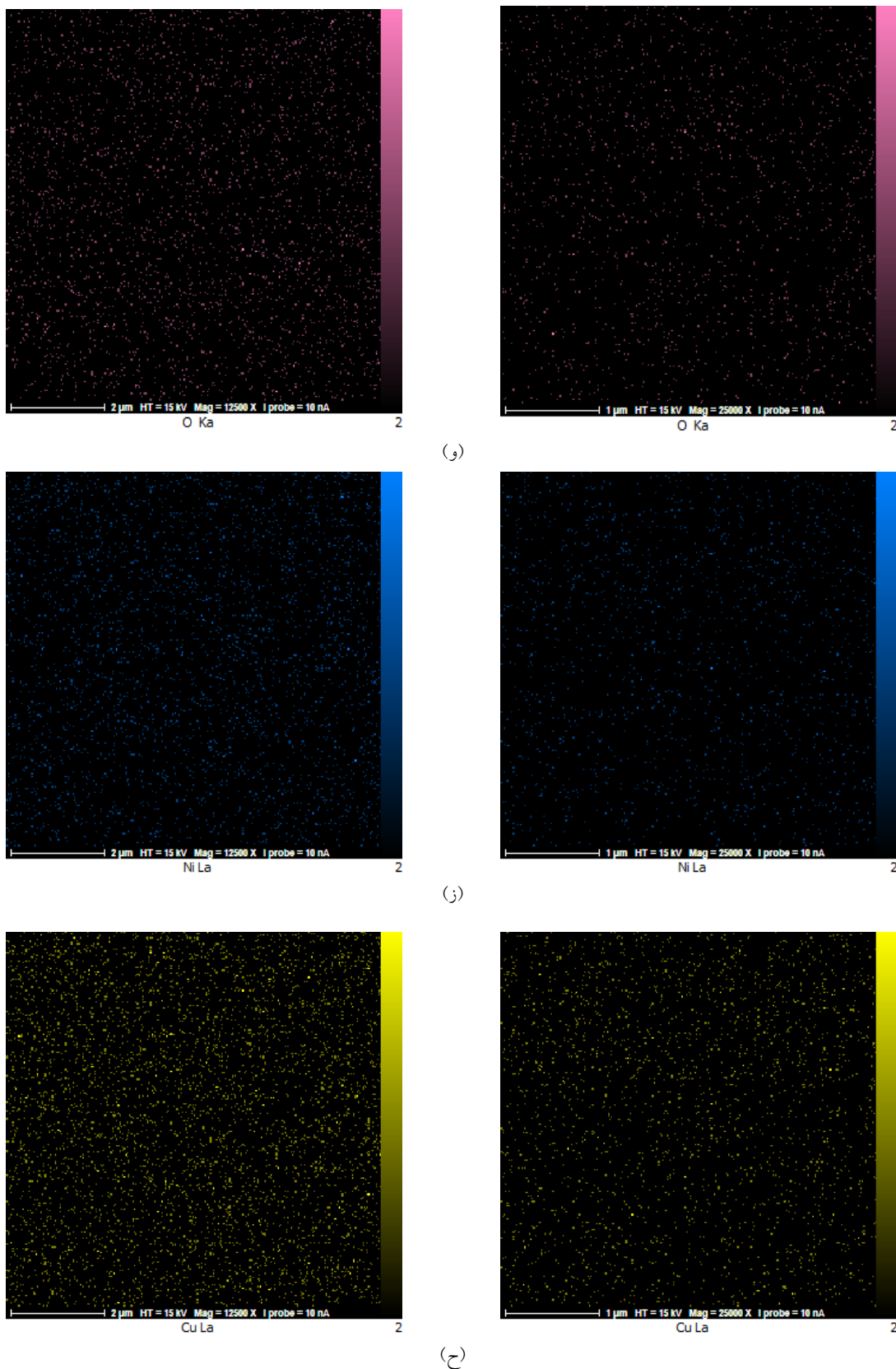
(ج)



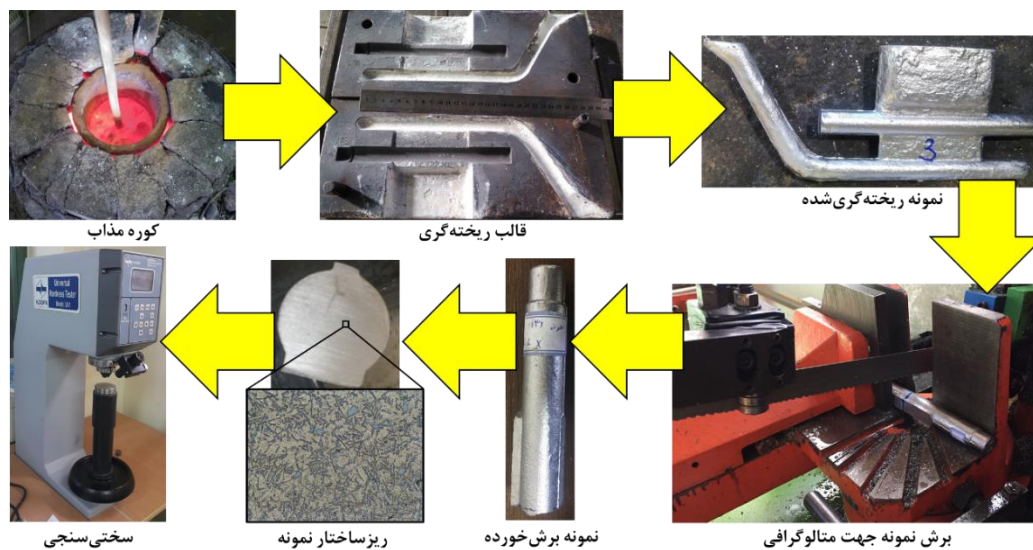
(د)



(ه)



شکل ۲ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی از سطح نانوکامپوزیت پایه فلزی آلومینیوم-سیلیسیم، (ب) توزیع عنصر آلومینیوم، (ج) توزیع عنصر سیلیسیم، (د) توزیع عنصر منیزیم، (ه) توزیع عنصر آهن، (و) توزیع عنصر اکسیژن، (ز) توزیع عنصر نیکل و (ح) توزیع عنصر مس



شکل ۳ مراحل مختلف ساخت تا سختی سنجی نمونه‌ها

جدول ۳ جزئیات فرآیند عملیات حرارتی T6 اجرا شده بر روی نمونه‌ها

پیرسازی		انحلال		نوع عملیات حرارتی
زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	
۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	T6-1
	۲۱۵			T6-2
	۲۳۰			T6-3
۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	T6-4
	۲۱۵			T6-5
	۲۳۰			T6-6
۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	T6-7
	۲۱۵			T6-8
	۲۳۰			T6-9

شایان ذکر است که آزمایش سختی سنجی با استفاده از دستگاه KOOPA Universal Hardness Tester مدل UV1 و روش ویکرز بر روی نمونه‌ها اجرا گردید. به منظور اطمینان از دقت نتایج به دست آمده، آزمون‌ها سه بار بر روی هر نمونه اجرا شدند که شامل یک آزمون و دو تکرارپذیری بود.

شایان ذکر است که براساس داده‌های ارائه شده در جدول (۳)، دمای فرآیند انحلال و زمان فرآیند پیرسازی در تمامی موارد، به ترتیب برابر با ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. براساس نتایج ارائه شده در جدول (۴)، بیشترین میزان سختی برای آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم برابر با ۱۴۸ ویکرز و مربوط به عملیات حرارتی با زمان انحلال ۵ ساعت و دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین آن، برابر با ۱۰۹،۶۷ ویکرز و مربوط به عملیات حرارتی با زمان انحلال ۳ ساعت و دمای پیرسازی ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین، بیشترین میزان سختی برای نانوکامپوزیت پایه‌فلزی برابر با ۱۴۶ ویکرز و مربوط به

شایان ذکر است که آزمایش سختی سنجی با استفاده از دستگاه KOOPA Universal Hardness Tester مدل UV1 و روش ویکرز بر روی نمونه‌ها اجرا گردید. به منظور اطمینان از دقت نتایج به دست آمده، آزمون‌ها سه بار بر روی هر نمونه اجرا شدند که شامل یک آزمون و دو تکرارپذیری بود.

### نتایج و بحث

در این مقاله، به بررسی اثر استفاده هم‌زمان از نانوذرات رس و عملیات حرارتی بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم پیستون موتور خودرو پرداخته شده است. نتایج تجربی سختی سنجی آلیاژ عملیات حرارتی شده آلومینیوم پیستون موتور خودرو با و بدون

مشاهدات مشابهی در مورد فازهای آلیاژ آلومینیوم پیستون در مراجع [25,48] گزارش شده است. تغییرات ریز ساختاری پس از اجرای فرآیند عملیات حرارتی، کاملاً مشهود است [49,50].

خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، بیشتر تحت تأثیر ذرات بلوکی شکل سیلیسیم است [19] و [51-53]. به عبارت دیگر، حضور ذرات سیلیسیم به شکل بلوکی، موجب افزایش خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد [54,55]. در واقع، ذرات سیلیسیم که به شکل نامنظم در فاز زمینه وجود داشته، پس از اجرای عملیات حرارتی، به شکل منظم و یکنواخت توزیع شده است [39,49,56]. به طور کل، اجرای این نوع عملیات حرارتی، موجب ایجاد دو تغییر عمده در آلیاژهای آلومینیوم شده است؛ یکی بهبود شکل‌پذیری (Ductility) و چقرمگی شکست (Fracture Toughness) در نتیجه کروی شدن ذرات سیلیسیم [57] و دیگری، بهبود تنش تسلیم [57,58]. اثر اول، از فرآیند انحلال و اثر دوم، از ترکیب فرآیند انحلال، خنک‌سازی و پیرسازی مصنوعی حاصل گردیده است [49,59,60]. با افزایش سختی آلیاژ آلومینیوم پس از اجرای عملیات حرارتی T6، می‌توان انتظار افزایش خواص مکانیکی و نیز بهبود عمر خستگی کم‌چرخه این آلیاژ را در دمای محیط داشت که این امر، در نتیجه کروی شدن ذرات سیلیسیم است [49]. خنک‌سازی پس از فرآیند انحلال، موجب ایجاد مس جامد فوق اشباع در فاز زمینه می‌گردد [50]. طی فرآیند انحلال، ترکیبات حاوی مس ساخته شده و پس از فرآیند پیرسازی رسوب می‌کنند [50]. در نتیجه فرآیند پیرسازی، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم بهبود می‌یابد [39]. تئوری نابه-جایی‌ها، افزایش خواص مکانیکی را پس از عملیات حرارتی T6، توجیه می‌کند. تحرک نابه‌جایی‌ها با ذرات رسوب‌کرده محدود می‌شود که در نتیجه این محدودیت، حرکت نابه‌جایی آهسته شده و مقاومت کششی افزایش می‌یابد [61]. مطابق تصویر ریزساختار نمونه‌ها در شکل (۴) می‌توان دریافت که اندازه ذرات سیلیسیم در نتیجه افزودن نانوذرات رس، بیشتر شده شده که این امر با توجه به وجود حدود ۵۰ درصد سیلیسیم اکسید در ترکیب شیمیایی نانوذرات رس، مورد انتظار بوده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که عملیات حرارتی، تغییری در مقدار ذرات سیلیسیم ایجاد نکرده و فقط اندازه ذرات را دچار تغییراتی می‌نماید [62].

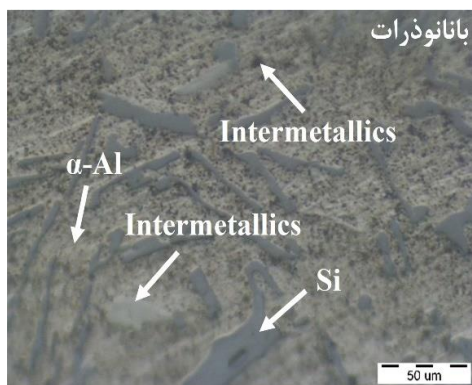
عملیات حرارتی با زمان انحلال ۵ ساعت و دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین آن، برابر با ۱۱۴،۳۳ ویکرز و مربوط به عملیات حرارتی با زمان انحلال ۳ ساعت و دمای پیرسازی ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. بررسی مراجع مختلف نشان داد که سختی به دست‌آمده برای هر دو نوع نمونه با شرایط عملیات حرارتی مختلف، در بازه سختی ارائه‌شده برای آلیاژ پیستون در مراجع [42,43] بوده است.

بر این اساس، با افزایش دمای فرآیند پیرسازی در عملیات حرارتی، از میزان سختی هر دو نوع نمونه، کاسته شده است که این امر با نتایج ارائه‌شده در مرجع [38] مطابقت دارد. همچنین، در مراجع [44,45] نیز نتایج مشابه با نتایج به دست‌آمده در ای پژوهش پزارش شده که بر مبنای آن، افزایش دمای پیرسازی موجب کاهش شدید سختی آلیاژ آلومینیوم شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول (۴)، در دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان انحلال با میزان سختی رابطه مستقیم داشته، بدان معنا که با افزایش زمان فرآیند انحلال بر سختی هر دو نوع نمونه افزوده شده است. نتایج ارائه‌شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که طی عملیات حرارتی با زمان پیرسازی ۶ ساعت و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزودن نانوذرات رس به آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، موجب کاهش سختی شده است. با بررسی نتایج جدول (۴)، واضح است که اثر دمای پیرسازی بر میزان سختی نمونه بدون نانوذرات و با نانوذرات از اثر زمان انحلال بیشتر بوده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در مرجع [46]، با شرایط زمانی یکسان برای فرآیند پیرسازی، افزایش دما موجب کاهش سختی آلیاژ آلومینیوم شده که این امر به تغییرات ریزساختاری مربوط بوده است. در مرجع [16] نیز به این مسئله اشاره شده است که افزایش دمای فرآیند پیرسازی، موجب کاهش میزان سختی آلیاژ آلومینیوم شده و در مقابل، افزایش زمان این فرآیند، سختی بیشتر آلیاژ را موجب گردیده و به طور کل، وابستگی سختی آلیاژ آلومینیوم به فرآیند پیرسازی بیشتر از وابستگی آن به فرآیند انحلال است.

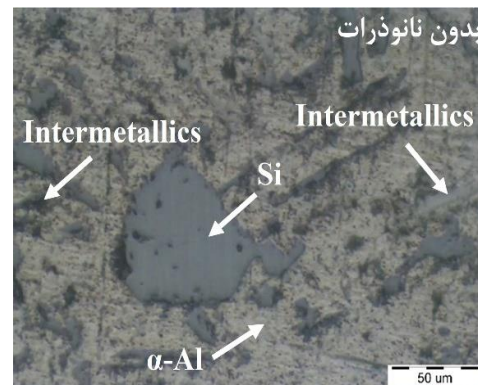
شکل (۴)، تصویر میکروسکوپ نوری را از سطح آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم عملیات حرارتی شده با روش‌های مختلف (بر اساس کدگذاری جدول ۳) را نشان می‌دهد. فاز آلومینیوم زمینه، ذرات سیلیسیم و ذرات بین‌فلزی، در ریزساختار، با فلش مشخص شده‌اند. شایان ذکر است که در این شکل، ذرات بین‌فلزی با رنگ روشن، نشان‌دهنده ترکیبات آلومینیوم-مس و ذرات بین‌فلزی با رنگ تیره، نشان‌دهنده ترکیبات آلومینیوم-آهن هستند [47].

جدول ۴ نتایج تجربی سختی سنجی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم و نانوکامپوزیت پایه‌فلزی آلومینیوم

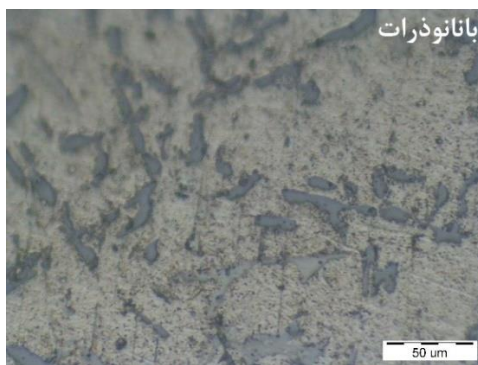
دمای پیرسازی (درجه سانتی‌گراد)						زمان انحلال (ساعت)	نمونه
۲۳۰		۲۱۵		۲۰۰			
انحراف معیار	سختی ویکرز	انحراف معیار	سختی ویکرز	انحراف معیار	سختی ویکرز		
۱.۶۳	۱۱۷.۰۰	۲.۳۶	۱۳۳.۶۷	۰.۹۴	۱۴۱.۶۷	۱	بدون نانوذرات
۳.۳۰	۱۰۹.۶۷	۰.۹۴	۱۳۲.۶۷	۲.۹۴	۱۴۵.۰۰	۳	
۱.۲۵	۱۱۴.۶۷	۲.۱۶	۱۲۹.۰۰	۰.۸۲	۱۴۸.۰۰	۵	
۰.۸۲	۱۱۶.۰۰	۲.۱۶	۱۳۳.۰۰	۲.۸۷	۱۳۸.۳۳	۱	با نانوذرات
۳.۰۹	۱۱۴.۳۳	۱.۲۵	۱۳۵.۳۳	۰.۹۴	۱۴۱.۶۷	۳	
۱.۶۳	۱۲۴.۰۰	۳.۰۹	۱۲۵.۶۷	۲.۴۵	۱۴۶.۰۰	۵	



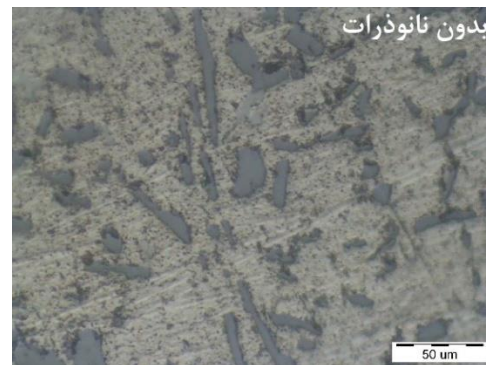
(ب)



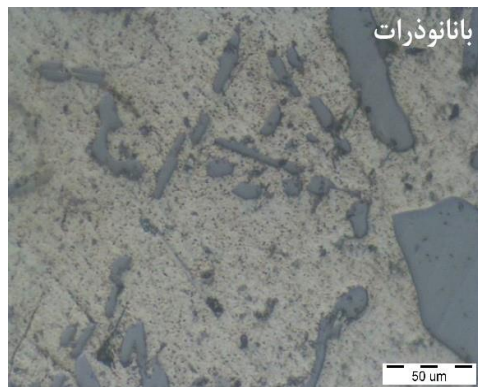
(الف)



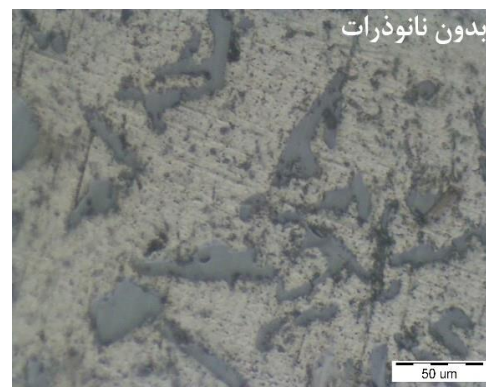
(د)



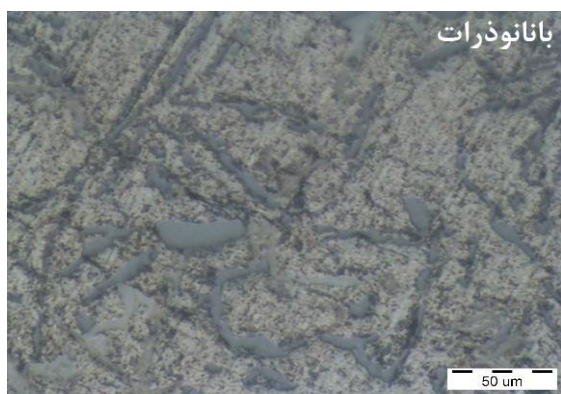
(ج)



(و)



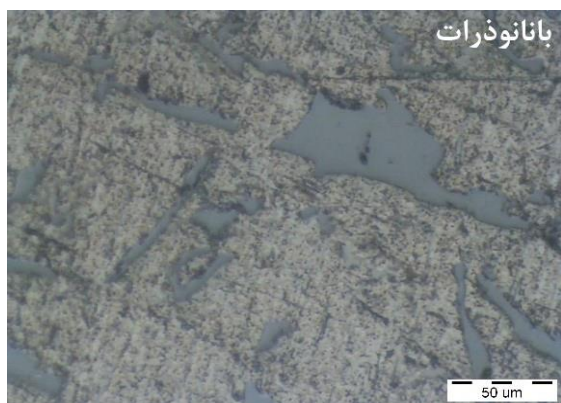
(ه)



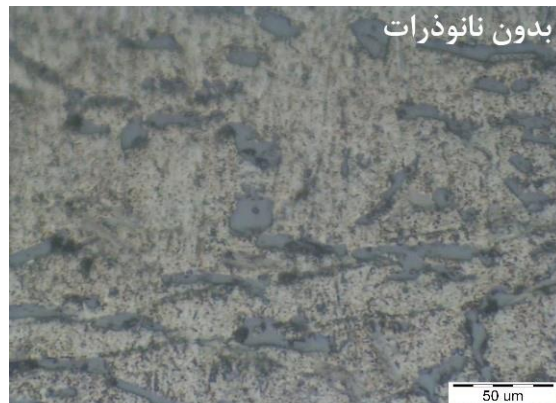
(ح)



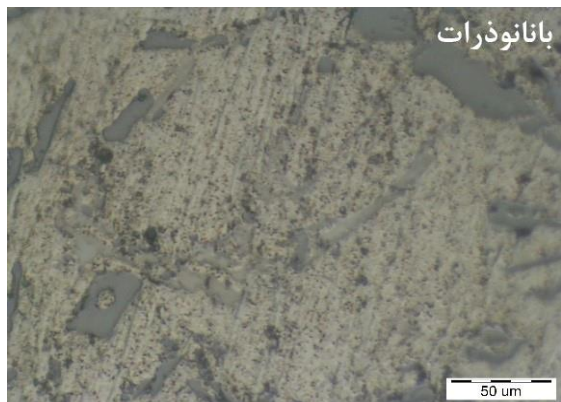
(ز)



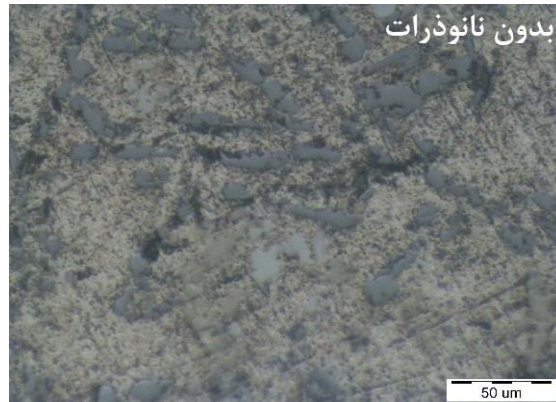
(ی)



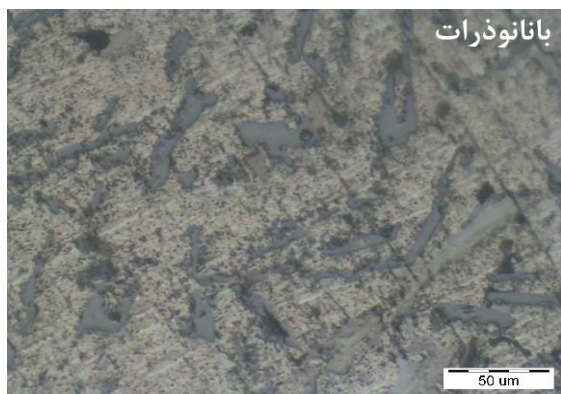
(ط)



(ج)



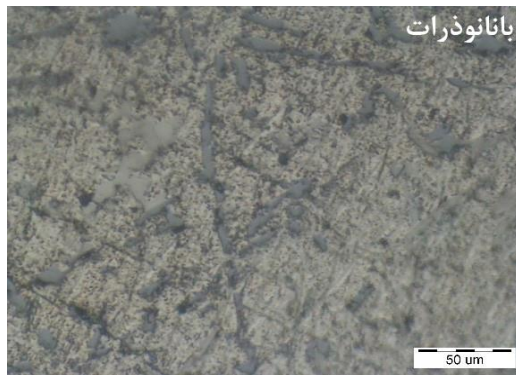
(ک)



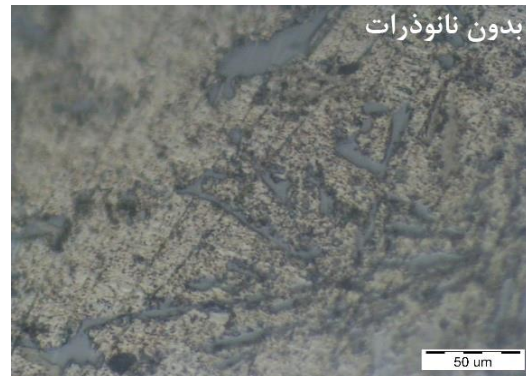
(ن)



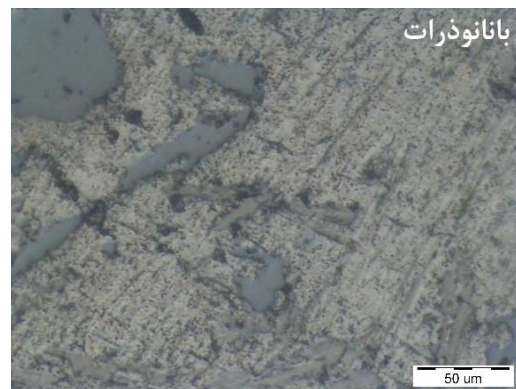
(م)



(ع)



(س)



(ص)



(ف)

شکل ۴: تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه عملیات حرارتی شده با کد (الف) و (ب) T6-1، (ج) و (د) T6-2، (ه) و (و) T6-3، (ز) و (ح) T6-4، (ط) و (ی) T6-5، (ک) و (ل) T6-6، (م) و (ن) T6-7، (س) و (ع) T6-8، (ف) و (ص) T6-9

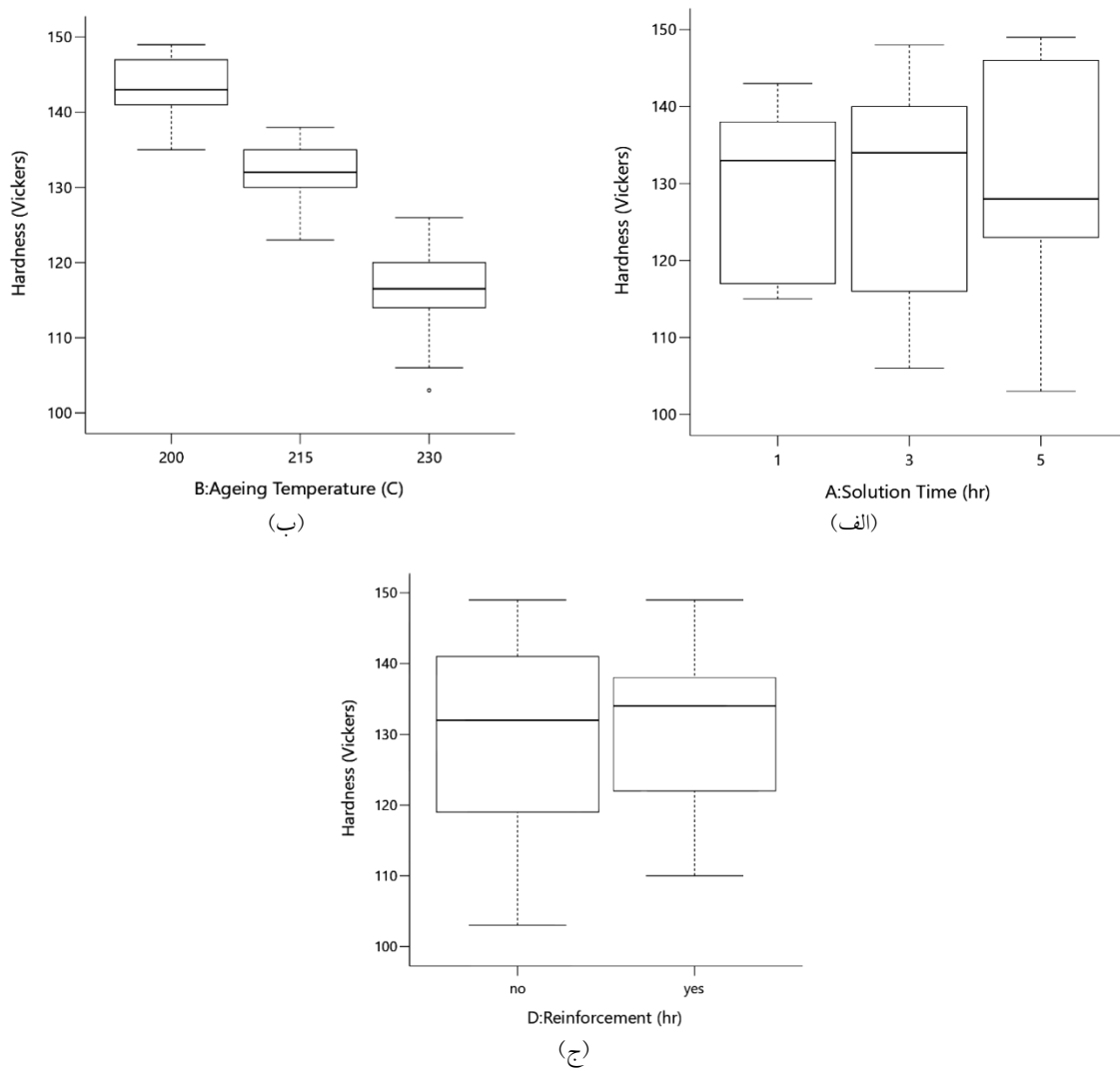
خطا برای پارامتر  $T_a \times N$  وجود دارد. در واقع احتمال رخداد پارامتر  $T_a$  و  $T_a \times N$  به ترتیب برابر با ۹۹,۹۹ درصد و ۹۷,۱۲ درصد خواهد بود. شکل (۵)، تغییرات سختی را برحسب پارامترهای مختلف شامل زمان انحلال، دمای پیرسازی و استفاده از نانوذرات رس، به شکل جداگانه، نشان می‌دهد. مطابق شکل، پراکندگی داده‌های ناشی از تغییرات زمان انحلال و نیز افزودن نانوذرات رس، نسبت به پراکندگی داده‌های مربوط به تغییرات دمای پیرسازی، بیشتر بوده است. با افزایش زمان انحلال به ۵ ساعت، از سختی نمونه به مقدار کمی کاسته شده است. در مقابل، شدت کاهش سختی نمونه بر اثر افزایش دمای پیرسازی، بسیار بیشتر بوده است. همچنین، استفاده از نانوذرات تقویتی رس نیز اندک اثر مثبتی در افزایش میزان سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم داشته است. براساس نتایج ارائه شده در مرجع [63]، اثر فرآیند پیرسازی بر سختی آلیاژ آلومینیوم، بیشتر از اثر فرآیند انحلال بوده به طوری که اجرای دومرحله‌ای فرآیند پیرسازی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، افزایش ۲۸ درصدی سختی آن را در مقایسه با اجرای تک مرحله‌ای آن در پی داشته است.

مطابق مطالب پیشین، در این پژوهش به منظور انجام تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی و نیز استفاده از نانوذرات رس بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، از روش تحلیل رگرسیون استفاده شده است. جدول (۵)، مقادیر P-value و F-value را برای پارامترهای مختلف عملیات حرارتی، نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در این جدول، اثرگذاری یا عدم اثرگذاری و نیز میزان اثرگذاری نانوذرات رس ( $N$ )، پارامترهای عملیات حرارتی شامل زمان انحلال ( $t_s$ )، دمای پیرسازی ( $T_a$ ) و نیز اثرات متقابل هریک از پارامترها، ارائه شده است. بیشتر نیز گفته شد که مقادیر کوچکتر از ۰,۰۵ برای P-value بیانگر اثرگذار بودن پارامتر مورد نظر است. همچنین، مقادیر بزرگتر برای F-value، نشان از اثرگذاری بیشتر پارامتر دارد.

براساس نتایج ارائه شده در جدول (۵)، دمای پیرسازی، با P-Value کمتر از ۰,۰۰۰۱ و نیز اثر متقابل دمای پیرسازی و استفاده از نانوذرات رس با P-Value برابر با ۰,۰۲۸۸، پارامترهای با اثر چشمگیر در سختی هستند. بر این اساس، کمتر از ۰,۰۱ درصد احتمال خطا برای پارامتر  $T_a$  و نیز کمتر از ۳ درصد احتمال بروز

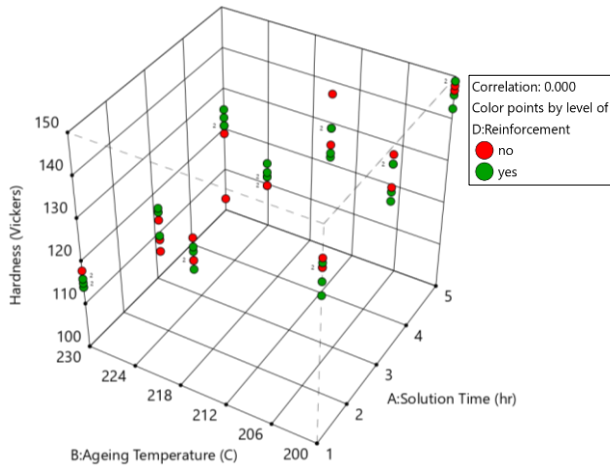
جدول ۵ اثرگذاری و میزان اثرگذاری هریک از پارامترهای مختلف بر میزان سختی

R <sup>2</sup>	اثرگذاری	F-value	P-value	پارامتر
۸۷,۴۳	کم	۱,۱۶۰۰	۰,۲۸۶۹	t <sub>s</sub>
	زیاد	۲۹۳,۸۶۰۰	<۰,۰۰۰۱	T <sub>a</sub>
	کم	۰,۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰	N
	کم	۰,۶۱۳۰	۰,۴۳۷۹	t <sub>s</sub> × t <sub>s</sub>
	کم	۲,۶۴۰۰	۰,۱۱۱۱	T <sub>a</sub> × T <sub>a</sub>
	کم	۱,۰۴۰۰	۰,۳۱۲۳	t <sub>s</sub> × T <sub>a</sub>
	کم	۰,۴۳۶۵	۰,۵۱۲۳	t <sub>s</sub> × N
	زیاد	۵,۱۱۰۰	۰,۰۲۸۸	T <sub>a</sub> × N
	کم	۱,۲۳۰۰	۰,۲۷۴۲	t <sub>s</sub> × T <sub>a</sub> × N

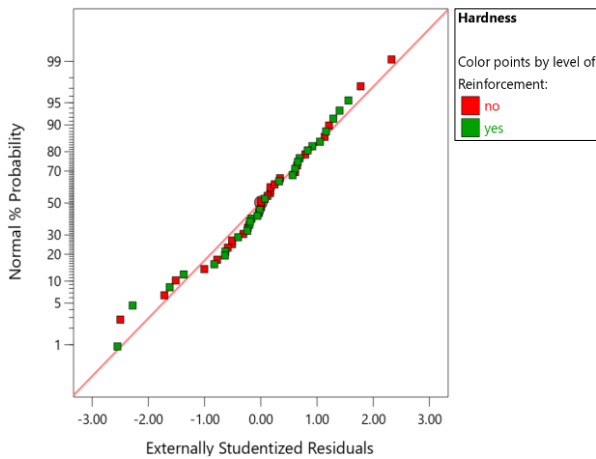


شکل ۵ تغییرات سختی برحسب پارامترهای مختلف شامل (الف) زمان انحلال، (ب) دمای پیرسازی و (ج) نانوذرات رس

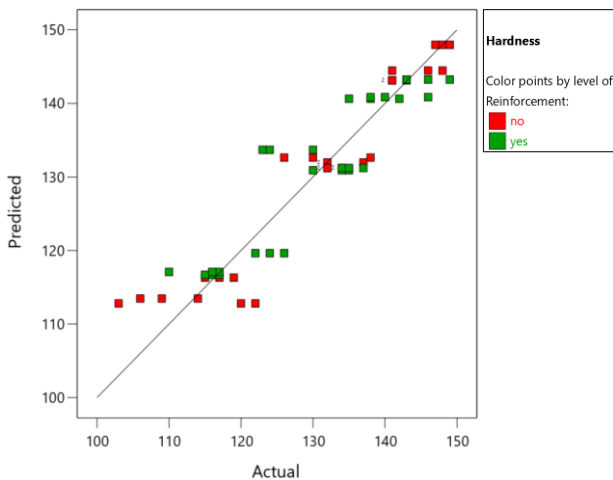




شکل ۶ نمودار سختی برحسب زمان انحلال و دمای پیرسازی برای نمونه با و بدون نانوذرات رس



شکل ۷ توزیع نرمال داده‌های سختی برای نمونه‌های با و بدون نانوذرات رس



شکل ۸ پراکندگی داده‌های تجربی و تئوری سختی برای نمونه‌های با و بدون نانوذرات رس

با مشاهده نتایج شکل (۵)، می‌توان دریافت که با کاهش زمان انحلال و نیز افزایش دمای پیرسازی، سختی نمونه کاهش یافته است. براساس نتایج ارائه شده در مرجع [38] نیز افزایش دما موجب کاهش سختی آلیاژ گردیده است.

معادله به‌دست‌آمده برای سختی براساس نتایج تحلیل رگرسیون پارامترهای موردبررسی، در رابطه (۴) ارائه شده است. شایان ذکر است که رابطه حاصل از پارامترهای تعریف‌شده پاسخ به‌دست‌آمده، برای شرایط مختلف عملیات حرارتی بر روی آلیاژ موردنظر، قابل استفاده است [64]. از این روش، می‌توان در ارزیابی خواص مختلف آلیاژ آلومینیوم شامل مقاومت تسلیم، مقاومت ضربه، سختی و نیز خواص خستگی، استفاده نمود [64-66].

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & 0.8611 \times t_s - 13.69 \times T_a + 1.08 \times t_s^2 \\ & - 2.25 \times T_a^2 - t_s \times T_a + 0.5278 \times t_s \times N \\ & + 1.81 \times T_a \times N + 1.08 \times t_s \times T_a \times N \end{aligned} \quad (4)$$

شکل (۶)، نمودار سختی را برحسب زمان انحلال و دمای پیرسازی نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده در این شکل، بیشترین میزان سختی برای آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم، با اجرای عملیات حرارتی با زمان انحلال ۵ ساعت دمای پیرسازی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌دست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش زمان انحلال از ۱ ساعت به ۵ ساعت موجب افزایش تدریجی سختی شده است. واضح است که افزایش دمای فرآیند پیرسازی موجب کاهش سختی گردیده است. نتایج ارائه‌شده در مراجع [5,67] نیز مؤید نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مبنی بر کاهش میزان سختی نمونه در نتیجه افزایش دمای پیرسازی است.

شکل (۷)، توزیع نرمال خطی داده‌های سختی را نشان می‌دهد. شکل (۸)، پراکندگی نتایج تجربی حاصل از آزمون سختی سنجی را نسبت به داده‌های تئوری سختی به‌دست‌آمده با رابطه (۴) نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، پراکندگی داده‌های تئوری نسبت به نتایج تجربی، کمتر از ۱۰ درصد بوده و این امر نشان از دقت مدل تخمینی برای محاسبه سختی نمونه‌ها دارد.

نمونه عملیات حرارتی شده بدون نانو با ۵ ساعت انحلال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۶ ساعت پیرسازی در دمای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. شایان ذکر است که براساس نتایج ارائه شده در جدول (۶)، داده‌ها از پراکندگی مناسبی برخوردار بوده به طوری که ضریب اسکترباند داده‌ها، برابر با ۱,۱۱ بوده که نشان از دقت مدل رگرسیون داشته و مؤید نتایج ارائه شده در شکل (۸) است.

جدول (۶)، مقایسه نتایج تجربی سختی‌سنجی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم و نیز نانوکامپوزیت پایه‌فلزی را با نتایج به دست آمده از مدل رگرسیون نشان می‌دهد. براساس نتایج ارائه شده در این جدول، میانگین خطای نسبی حاصل از اختلاف نتایج سختی‌سنجی تجربی و نتایج تئوری حاصل از مدل رگرسیون، برابر با ۲,۶۱ درصد بوده است. همچنین، بیشینه خطای نسبی، برابر با ۹,۵۲ درصد و مربوط به اختلاف نتایج تجربی و تئوری

جدول ۶ مقایسه سختی تجربی با نتایج تئوری حاصل از آنالیز رگرسیون

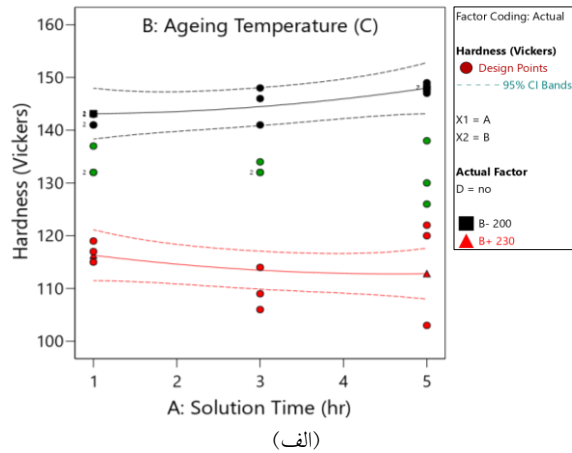
خطای نسبی (درصد)	سختی (ویکرز)		فرآیند پیرسازی		فرآیند انحلال		وجود نانوذرات
	تخمینی	تجربی	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی‌گراد)	
۱,۵۲	۱۴۳,۱۴	۱۴۱	۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	خیر
۱,۵۲	۱۴۳,۱۴	۱۴۱	۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	خیر
۰,۱۰	۱۴۳,۱۴	۱۴۳	۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	خیر
۰,۰۲	۱۳۱,۹۷	۱۳۲	۶	۲۱۵	۱	۵۰۰	خیر
۰,۰۲	۱۳۱,۹۷	۱۳۲	۶	۲۱۵	۱	۵۰۰	خیر
۳,۶۷	۱۳۱,۹۷	۱۳۷	۶	۲۱۵	۱	۵۰۰	خیر
۱,۱۴	۱۱۶,۳۱	۱۱۵	۶	۲۳۰	۱	۵۰۰	خیر
۲,۲۶	۱۱۶,۳۱	۱۱۹	۶	۲۳۰	۱	۵۰۰	خیر
۰,۵۹	۱۱۶,۳۱	۱۱۷	۶	۲۳۰	۱	۵۰۰	خیر
۲,۳۹	۱۴۴,۴۷	۱۴۸	۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	خیر
۲,۴۶	۱۴۴,۴۷	۱۴۱	۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	خیر
۱,۰۵	۱۴۴,۴۷	۱۴۶	۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	خیر
۲,۰۷	۱۳۱,۲۲	۱۳۴	۶	۲۱۵	۳	۵۰۰	خیر
۰,۵۹	۱۳۱,۲۲	۱۳۲	۶	۲۱۵	۳	۵۰۰	خیر
۰,۵۹	۱۳۱,۲۲	۱۳۲	۶	۲۱۵	۳	۵۰۰	خیر
۷,۰۵	۱۱۳,۴۷	۱۰۶	۶	۲۳۰	۳	۵۰۰	خیر
۰,۴۶	۱۱۳,۴۷	۱۱۴	۶	۲۳۰	۳	۵۰۰	خیر
۴,۱۰	۱۱۳,۴۷	۱۰۹	۶	۲۳۰	۳	۵۰۰	خیر
۰,۶۶	۱۴۷,۹۷	۱۴۷	۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	خیر
۰,۰۲	۱۴۷,۹۷	۱۴۸	۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	خیر
۰,۶۹	۱۴۷,۹۷	۱۴۹	۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	خیر
۲,۰۳	۱۳۲,۶۴	۱۳۰	۶	۲۱۵	۵	۵۰۰	خیر
۵,۲۷	۱۳۲,۶۴	۱۲۶	۶	۲۱۵	۵	۵۰۰	خیر
۳,۸۸	۱۳۲,۶۴	۱۳۸	۶	۲۱۵	۵	۵۰۰	خیر
۹,۵۲	۱۱۲,۸۱	۱۰۳	۶	۲۳۰	۵	۵۰۰	خیر
۷,۵۳	۱۱۲,۸۱	۱۲۲	۶	۲۳۰	۵	۵۰۰	خیر
۵,۹۹	۱۱۲,۸۱	۱۲۰	۶	۲۳۰	۵	۵۰۰	خیر
۱,۹۱	۱۴۰,۶۴	۱۳۸	۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	بله

خطای نسبی (درصد)	سختی (ویکرز)		فرآیند پیرسازی		فرآیند انحلال		وجود نانوذرات
	تخمینی	تجربی	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی گراد)	زمان (ساعت)	دما (درجه سانتی گراد)	
۴,۱۸	۱۴۰,۶۴	۱۳۵	۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	بله
۰,۹۶	۱۴۰,۶۴	۱۴۲	۶	۲۰۰	۱	۵۰۰	بله
۰,۷۱	۱۳۰,۹۲	۱۳۰	۶	۲۱۵	۱	۵۰۰	بله
۲,۳۰	۱۳۰,۹۲	۱۳۴	۶	۲۱۵	۱	۵۰۰	بله
۳,۰۲	۱۳۰,۹۲	۱۳۵	۶	۲۱۵	۱	۵۰۰	بله
۰,۵۹	۱۱۶,۶۹	۱۱۶	۶	۲۳۰	۱	۵۰۰	بله
۱,۴۷	۱۱۶,۶۹	۱۱۵	۶	۲۳۰	۱	۵۰۰	بله
۰,۲۶	۱۱۶,۶۹	۱۱۷	۶	۲۳۰	۱	۵۰۰	بله
۲,۰۷	۱۴۰,۸۶	۱۳۸	۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	بله
۳,۵۲	۱۴۰,۸۶	۱۴۶	۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	بله
۰,۶۱	۱۴۰,۸۶	۱۴۰	۶	۲۰۰	۳	۵۰۰	بله
۲,۰۷	۱۳۱,۲۲	۱۳۴	۶	۲۱۵	۳	۵۰۰	بله
۴,۲۲	۱۳۱,۲۲	۱۳۷	۶	۲۱۵	۳	۵۰۰	بله
۲,۸۰	۱۳۱,۲۲	۱۳۵	۶	۲۱۵	۳	۵۰۰	بله
۰,۰۷	۱۱۷,۰۸	۱۱۷	۶	۲۳۰	۳	۵۰۰	بله
۶,۴۴	۱۱۷,۰۸	۱۱۰	۶	۲۳۰	۳	۵۰۰	بله
۰,۹۳	۱۱۷,۰۸	۱۱۶	۶	۲۳۰	۳	۵۰۰	بله
۰,۱۷	۱۴۳,۲۵	۱۴۳	۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	بله
۳,۸۶	۱۴۳,۲۵	۱۴۹	۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	بله
۱,۸۸	۱۴۳,۲۵	۱۴۶	۶	۲۰۰	۵	۵۰۰	بله
۸,۶۹	۱۳۳,۶۹	۱۲۳	۶	۲۱۵	۵	۵۰۰	بله
۲,۸۴	۱۳۳,۶۹	۱۳۰	۶	۲۱۵	۵	۵۰۰	بله
۷,۸۱	۱۳۳,۶۹	۱۲۴	۶	۲۱۵	۵	۵۰۰	بله
۵,۰۵	۱۱۹,۶۴	۱۲۶	۶	۲۳۰	۵	۵۰۰	بله
۱,۹۳	۱۱۹,۶۴	۱۲۲	۶	۲۳۰	۵	۵۰۰	بله
۳,۵۲	۱۱۹,۶۴	۱۲۴	۶	۲۳۰	۵	۵۰۰	بله

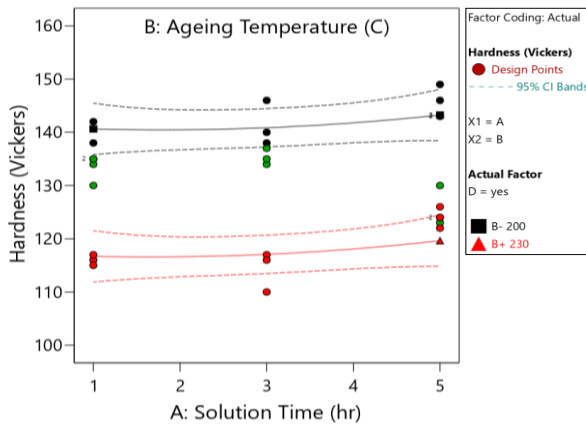
است.

به عبارت دیگر، نمونه آلومینیوم - سیلیسیم و نانوکامپوزیت پایه فلزی آلومینیوم، سختی نسبتاً مشابهی دارند. شکل (۱۰)، اثر متقابل زمان انحلال و دمای پیرسازی را بر سختی نمونه بدون نانوذرات و با نانوذرات رس، نشان می‌دهد. مطابق شکل، نمودارهای مربوط به زمان انحلال و دمای پیرسازی برای هر دو نوع نمونه با و بدون نانوذرات یکدیگر را قطع نکرده است. در نتیجه، در بازه تعریف شده یعنی زمان‌های ۱ ساعت، ۳ ساعت و ۵ ساعت برای فرآیند انحلال و نیز دماهای ۲۰۰ درجه سانتی گراد، ۲۱۵ درجه سانتی گراد و ۲۳۰ درجه سانتی گراد برای

شکل (۹)، اثر پارامترهای مختلف شامل زمان انحلال، دمای پیرسازی و استفاده از نانوذرات رس را بر سختی آلیاژ آلومینیوم - سیلیسیم نشان می‌دهد. مطابق شکل، در نتیجه افزایش زمان انحلال روند محسوسی برای سختی نمونه مشاهده نمی‌شود. در حالی که افزایش دمای پیرسازی کاهش شدید سختی نمونه را موجب شده است. به طور کل، دمای بالاتر در فرآیند پیرسازی، موجب رشد سینماتیک رسوبات و در نتیجه، کاهش میزان سختی ماده می‌گردد [68]. مشابه نتیجه افزایش زمان انحلال در مورد استفاده از نانوذرات رس نیز مشاهده می‌شود؛ به طوری که می‌توان دریافت استفاده از نانوذرات رس اثر چشمگیری بر سختی نمونه نداشته



(الف)



(ب)

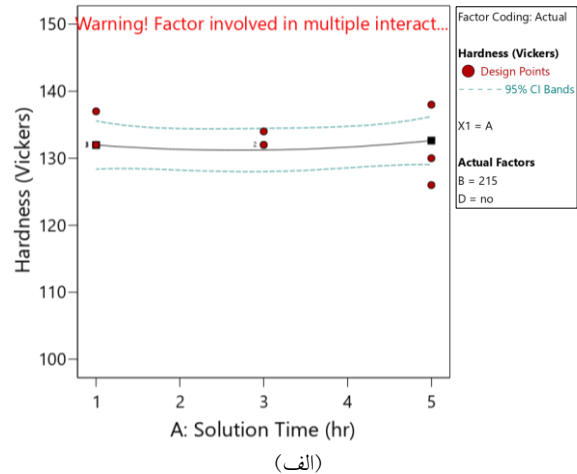
شکل ۱۰ اثر متقابل زمان انحلال و دمای پیرسازی بر سختی نمونه (الف) بدون نانوذرات و (ب) با نانوذرات

به منظور بررسی دقیق تر اثر پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه، نمودار کانتور تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه بدون نانوذرات و با نانوذرات رس، در شکل (۱۱) ارائه شده است. همانطور که قابل مشاهده است، کاهش دمای پیرسازی موجب افزایش سختی نمونه با و بدون نانوذرات شده است. در مقابل، افزایش دمای پیرسازی، سختی هر دو نوع نمونه را کاهش داده است.

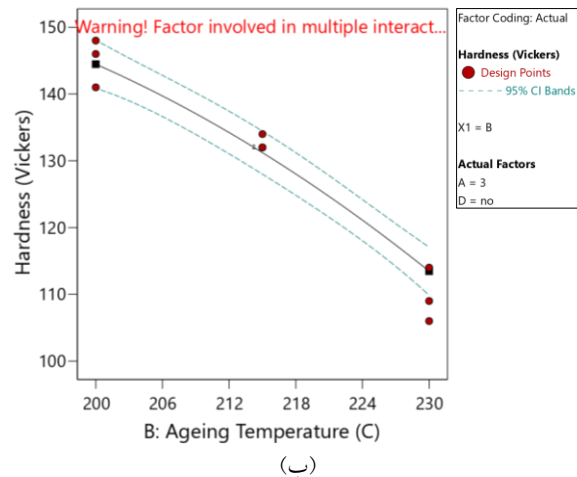
نتایج به دست آمده، با نتایج ارائه شده در مرجع [16]، مطابقت دارد. افزایش سختی طی فرآیند پیرسازی را می توان به چندین بخش از جمله جوانه زنی نواحی خوشه ای خالی، تشکیل ناحیه گینیر- پرستون، جوانه زنی و رشد سریع رسوبات ذرات ریز و... که به شکل نیمه منسجم با فاز آلومینیوم زمینه هستند، تقسیم نمود. این امر موجب افزایش مقاومت آلیاژ آلومینیوم می گردد [69].

شکل (۱۲)، نمودار رگرسیون خطی چندگانه را برای اثر پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه با و بدون نانوذرات

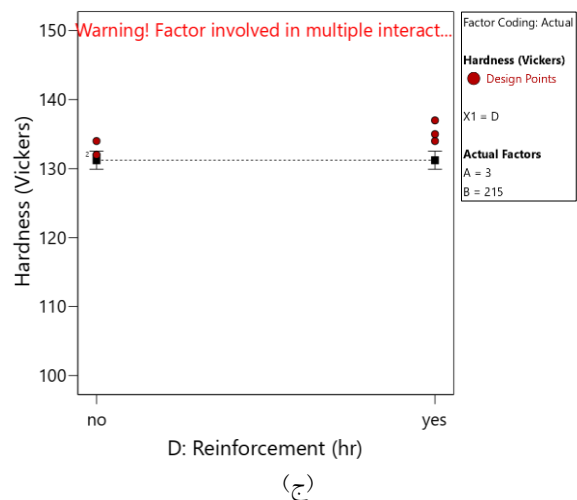
فرآیند پیرسازی، اثر متقابل وجود ندارد. شایان ذکر است که با توجه به شیب خطوط، نمودارها قطعا در خارج بازه تعریف شده یکدیگر را قطع کرده و در کل، تقابل وجود دارد که موضوع اصلی مورد بررسی در این مقاله نبوده است.



(الف)

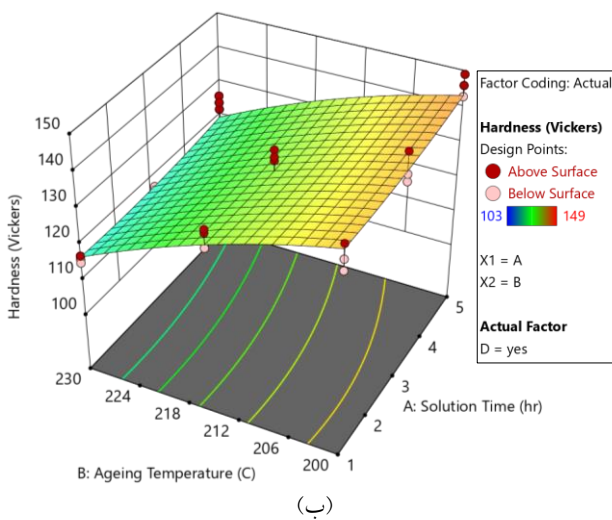
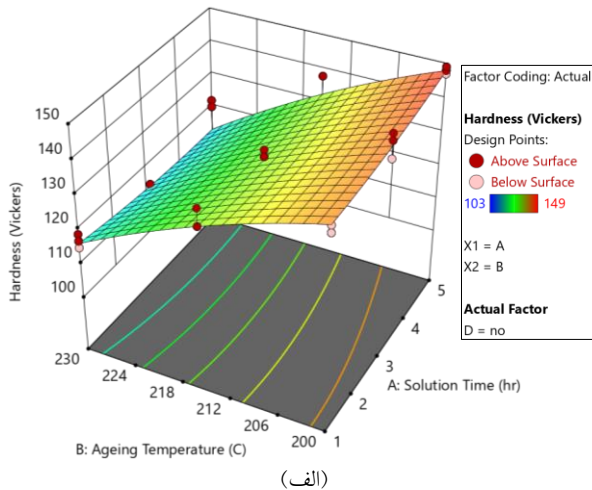


(ب)



(ج)

شکل ۹ اثر پارامترهای (الف) زمان انحلال، (ب) دمای پیرسازی و (ج) نانوذرات رس، بر سختی نمونه



شکل ۱۲ نمودار رگرسیون خطی چندگانه برای اثر عملیات حرارتی بر سختی نمونه (الف) بدون نانوذرات و (ب) با نانوذرات رس

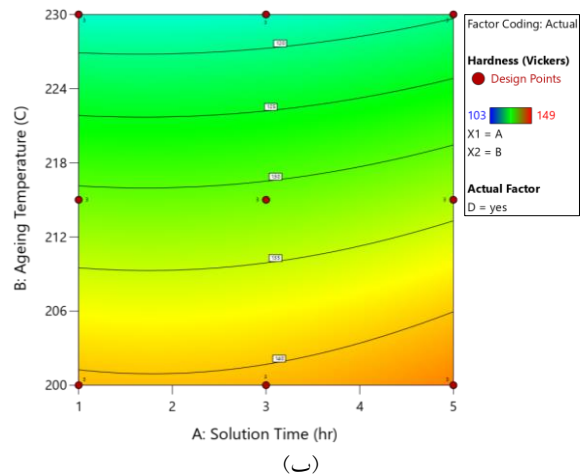
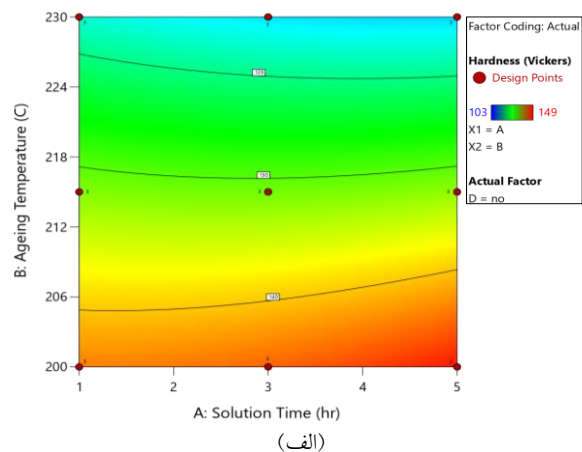
### نتیجه گیری

در این مقاله، به تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات حرارتی شامل انحلال و پیرسازی و نیز، افزودن نانوذرات خاک رس، بر سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم پیستون موتور خودرو، پرداخته شده است. خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش، به صورت زیر است:

۱. سختی آلیاژ پایه پس از افزودن نانوذرات و اجرای فرآیند عملیات حرارتی، افزایش یافت.
۲. زمان انحلال به تنهایی، اثر معناداری بر سختی آلیاژ آلومینیوم نداشت.
۳. افزایش دمای فرآیند پیرسازی، موجب کاهش سختی آلیاژ گردید.

رس نشان می دهد. با بررسی این نمودار نیز می توان دریافت که کاهش دمای پیرسازی، سختی هردو نمونه را افزایش داده است [38].

همچنین، برای نمونه عملیات حرارتی شده با فرآیند پیرسازی تحت ۲۰۰ درجه سانتی گراد، افزایش زمان انحلال سختی نمونه را افزایش داده است. براساس نتایج ارائه شده در مرجع [70] نیز افزایش زمان انحلال و کاهش دمای پیرسازی، موجب افزایش سختی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم می گردد. کاهش دما و نیز زمان فرآیند پیرسازی، موجب افزایش سختی شده و به تبع آن، خواص کششی، سایشی و خستگی ماده بهبود می یابد [71,72]. بررسی ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم عملیات حرارتی شده با بیشترین میزان سختی، وجود رسوبات گرد سیلیسیم را در فضای بین دندریتی فاز آلومینیوم (در مرز دانه) نشان داد [70]. به طور کل، عملیات حرارتی موجب تغییر شکل فاز سیلیسیم و بهبود خواص خستگی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم می گردد [11] و [62,63].



شکل ۱۱ نمودار کانتور پارامترهای عملیات حرارتی بر سختی نمونه (الف) بدون نانوذرات و (ب) با نانوذرات

حاصل از مدل رگرسیون مشاهده گردید به طوری که میانگین و بیشینه خطای نسبی حاصل از اختلاف نتایج تجربی و تئوری سختی سنجی، به ترتیب برابر با ۲,۶۱ و ۹,۵۲ درصد به دست آمد.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان، از شرکت موتورسازی پویانستانک جهت فراهم نمودن مواد اولیه و تجهیزات لازم جهت ریخته‌گری و از دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه سمنان جهت همکاری در اجرای فرآیندهای متالورژیکی، قدردانی می‌نمایند.

۴. افزودن نانوذرات، موجب افزایش اندک در مقدار سختی ماده شد.

۵. عملیات حرارتی و افزودن نانوذرات، موجب کروی شدن ذرات سیلیسیم در ریزساختار ماده و در نتیجه، افزایش سختی آلیاژ شدند.

۶. سختی هردو نمونه، طی فرآیند انحلال با زمان ۵ ساعت و فرآیند پیرسازی با دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به بیشترین مقدار خود رسید. بر این اساس، بیشترین میزان سختی برای آلیاژ آلومینیوم و نانوکامپوزیت پایه‌فلزی طی عملیات حرارتی با شرایط فوق، به ترتیب برابر با ۱۴۸ و ۱۴۶ ویکرز بوده است.

۷. تطابق خوبی میان نتایج تجربی سختی سنجی با نتایج تئوری

### مراجع

- [1] M. Azadi, "Effects of Strain Rate and Mean Strain on Cyclic Behavior of Aluminum Alloys under Isothermal and Thermo-Mechanical Fatigue Loadings," *International Journal of Fatigue*, vol. 47, pp. 148-153, 2013.
- [2] H. Bahmanabadi, *Experimental and Numerical Study on Low-cycle Fatigue Behavior of Aluminum Metal Matrix Nanocomposite at Different Temperatures*, MSc Thesis, Semnan University, 2020, (In Persian).
- [3] M. Zolfaghari, *Investigation of Nano-Particles Addition Effect on Bending High-Cycle Fatigue Lifetime in Engine Piston Aluminum Alloy*, MSc Thesis, Semnan University, 2018, (In Persian).
- [4] J. Mohamadigangaraj, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, "The Effect of Heat Treatment and Cooling Conditions on Friction Stir Processing of A390-10 wt% SiC Aluminium Matrix Composite," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 263, pp. 124423, 2021.
- [5] M. Alphonse, V. K. B. Raja, M. S. Vivek, N. V. S. D. Raj, M. S. S. Darshan, P. Bharmal, "Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Forged Aluminium Alloy AA2219," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3811-3815, 2021.
- [6] M. Azadi, S. Rezaezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, "Effects of Various Ageing Heat Treatments on Microstructural Features and Hardness of Piston Aluminum Alloy," *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 32, no. 1, pp. 92-98, 2019.
- [7] E. Rajkeerthi, C. P. Satyanarayan, M. Jaivignesh, N. Pradeep, P. Hariharan, "Effect of Heat Treatment on Strength of Aluminium Matrix Composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 4419-4425, 2020.
- [8] B. Safarbalı, M. Shamanian, A. Eslami, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on Joint Properties of Dissimilar Friction Stir Welded 2024-T4 and 7075-T6 Aluminum Alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 28, no. 7, pp. 1287-1297, 2018.
- [9] Z. Yuan, W. Tian, F. Li, Q. Fu, X. Wang, W. Qian, W. An, "Effect of Heat Treatment on The Interface of High-Entropy Alloy Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 822, pp.

- 153658, 2020.
- [10] A. K. Padap, A.P. Yadav, P. Kumar, N. Kumar, "Effect of Aging Heat Treatment and Uniaxial Compression on Thermal Behavior of 7075 Aluminum Alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 5442-5447, 2020.
- [11] M. Azadi, H. Bahmanabadi, F. Gruen, G. Winter, "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, pp. 139497, 2020.
- [12] J. Yi, G. Wang, S. Li, Z. Liu, Y. Gong, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of 6061-T6 Aluminum Alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 29, no. 10, pp. 2035-2046, 2019.
- [13] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, "Investigation of Tribological and Compressive Behaviors of Al/SiO<sub>2</sub> Nanocomposites After T6 Heat Treatment," *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 45, no. 1, 2020.
- [14] S. Prakash, R. John Felix Kumar, S. Jerome, "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of CNT Welded Aluminium Alloy 2024," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 13, pp. 26997-27003, 2018.
- [15] M. Azadi, A. Basiri, A. Dadashi, G. Winter, B. Seisenbacher, F. Gruen, "Effect of Nano-Clay Addition and Heat-Treatment on Tensile and Stress-Controlled Low-Cycle Fatigue Behaviors of Aluminum-Silicon Alloy: Effect of Nano-Clay Addition and Heat-Treatment," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 15, no. 57, pp. 373-397, 2021.
- [16] M. J. Sharifi, M. Azadi, M. Azadi, "Sensitivity Analysis of Heat Treatment Parameters on Cylinder-head Aluminum Alloy Properties by Regression Method," *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 57-74, 2021, (In Persian).
- [17] M. Azadi, *Improvement and Optimization of Vibration Behavior of a vehicle full body by Design of Experiments*, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, 2013, (In Persian).
- [18] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley and Sons, 2017.
- [19] M. Azadi, H. Bahmanabadi, J. Torkian, G. Nosrat, "Investigation of Nano-Clay Particles Addition on Microstructure, Fracture Surface, and Mechanical Properties of Piston Aluminum Alloy in Automotive Engine," *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, vol. 36.3, no. 2, pp. 41-49, 2020, (In Persian).
- [20] M. Wang, J. C. Pang, H. Q. Liu, S. X. Li, Z. F. Zhang, "Influence of Microstructures on The Tensile and Low-Cycle Fatigue Damage Behaviors of Cast Al12Si4Cu3NiMg Alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 759, pp. 797-803, 2019.
- [21] M. Wang, J. C. Pang, H. Q. Liu, C. L. Zou, S. X. Li, Z. F. Zhang, "Deformation Mechanism and Fatigue Life of An Al-12Si Alloy at Different Temperatures and Strain Rates," *International Journal of Fatigue*, vol. 127, pp. 268-274, 2019.
- [22] R. Canyook, R. Utakrut, C. Wongnichakorn, K. Fakpan, S. Kongiang, "The Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Rheocasting ADC12 Aluminum Alloy," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 3, pp. 9476-9482, 2018.
- [23] C. L. Chen, A. Richter, R. C. Thomson, "Mechanical Properties of Intermetallic Phases in Multi-Component Al-Si

- Alloys Using Nanoindentation,” *Intermetallics*, vol. 17, no. 8, pp. 634-641, 2009.
- [24] Z. Asghar, G. Requena, H. P. Degischer, P. Cloetens, “Three-Dimensional Study of Ni Aluminides in An AlSi12 Alloy by Means of Light Optical and Synchrotron Microtomography,” *Acta Materialia*, vol. 57, no. 14, pp. 4125-4132, 2009.
- [25] Y. Li, Y. Yang, Y. Wu, L. Wang, X. Liu, “Quantitative Comparison of Three Ni-Containing Phases to The Elevated-Temperature Properties of Al-Si Piston Alloys,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 26, pp. 7132-7137, 2010.
- [26] C. Y. Jeong, “Effect of Alloying Elements on High Temperature Mechanical Properties for Piston Alloy,” *Materials Transactions*, vol. 53, no. 1, pp. 234-239, 2012.
- [27] C. B. Basak, A. Meduri, N. Hari Babu, “Influence of Ni in High Fe Containing Recyclable Al-Si Cast Alloys,” *Materials and Design*, vol. 182, pp. 108017, 2019.
- [28] P. Apichai, J. Kajornchiyakul, J. T. H. Pearce, A. Wiengmoon, “Effect of Precipitation Hardening Temperatures and Times on Microstructure, Hardness and Tensile Properties of Cast Aluminium Alloy A319,” *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 28-33, 2011.
- [29] E. Feyzullahoğ lu, A. T. Ertürk, E. A. Guven, “Influence of Forging and Heat Treatment on Wear Properties of Al-Si and Al-Pb Bearing Alloys in Oil Lubricated Conditions,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 23, no. 12, pp. 3575-3583, 2013.
- [30] A. M. Samuel, E. M. Elgallad, H. W. Doty, S. Valtierra, F. H. Samuel, “Effect of Metallurgical Parameters on The Microstructure, Hardness Impact Properties, and Fractography of Al-(6.5-11.5) wt% Si based Alloys,” *Materials and Design*, vol. 107, pp. 426-439, 2016.
- [31] R. K. Singh, A. Telang, M. M. Khan, “Effect of T6 Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Abrasive Wear Response of Fly Ash Reinforced Al-Si Alloy,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 9, pp. 10062-10068, 2017.
- [32] W. Kasprzak, H. Kurita, G. Birsan, B. S. Amirkhiz, “Hardness Control of Al-Si HPDC Casting Alloy via Microstructure Refinement and Tempering Parameters,” *Materials and Design*, vol. 103, pp. 365-376, 2016.
- [33] S. Joseph, S. Kumar, R. P. Babu, “Compressive Flow Behavior of Al-Si based Alloy: Role of Heat Treatment,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 629, pp. 41-53, 2015.
- [34] M. Zeren, “The Effect of Heat-Treatment on Aluminum-based Piston Alloys”, *Materials and Design*, vol. 28, no. 9, pp. 2511-2517, 2007.
- [35] H. Yang, S. Ji, Z. Fan, “Effect of Heat Treatment and Fe Content on The Microstructure and Mechanical Properties of Die-Cast Al-Si-Cu Alloys,” *Materials and Design*, vol. 85, pp. 823-832, 2015.
- [36] L.F. Wang, J. Sun, X. L. Yu, Y. Shi, X. G. Zhu, L. Y. Cheng, H. H. Liang, B. Yan, L. J. Guo, “Enhancement in Mechanical Properties of Selectively Laser-Melted AlSi10Mg Aluminum Alloys by T6-like Heat Treatment,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 734, pp. 299-310, 2018.
- [37] O. E. Sebaie, A. M. Samuel, F. H. Samuel, H. W. Doty, “The Effects of Mischmetal, Cooling Rate and Heat Treatment on The Hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si Casting Alloys,” *Materials Science and Engineering*



- A, vol. 486, no. 1-2, pp. 241-252, 2008.
- [38] M. Farokhpour, M. S. A. Parast, M. Azadi, "Evaluation of Hardness and Microstructural Features in Piston Aluminum-Silicon Alloys after Different Ageing Heat Treatments," *Results in Materials*, vol. 16, pp. 100323, 2022.
- [39] L.Y. Pio, "Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminium Alloy," *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, pp. 2048-2052, 2011.
- [40] V. Firouzidor, M. Rajabi, E. Nejati, F. Khomamizadeh, "Effect of Microstructural Constituents on The Thermal Fatigue Life of A319 Aluminum Alloy," *Materials Science and Engineering A*, vol. 454-455, pp. 528-535, 2007.
- [41] K. Sasaki, T. Takahashi, "Low Cycle Thermal Fatigue and Microstructural Change of AC2B-T6 Aluminum Alloy," *International Journal of Fatigue*, vol. 28, no. 3, pp. 203-210, 2006.
- [42] A. Moffat, S. Barnes, B. Mellor, P. Reed, "The Effect of Silicon Content on Long Crack Fatigue Behaviour of Aluminium-Silicon Piston Alloys at Elevated Temperature," *International Journal of Fatigue*, vol. 27, no. 10-12, pp. 1564-1570, 2005.
- [43] S. H. Juang, L. J. Fan, H. P. O. Yang, "Influence of Preheating Temperatures and Adding Rates on Distributions of Fly Ash in Aluminum Matrix Composites Prepared by Stir Casting," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 16, no. 7, pp. 1321-1327, 2015.
- [44] J. L. Cavazos, R. Colas, "Precipitation in A Heat-Treatable Aluminum Alloy Cooled at Different Rates," *Materials Characterization*, vol. 47, no. 3-4, pp. 175-179, 2001.
- [45] K. El-Menshawey, A. W. A. El-Sayed, M. E. El-Bedawy, H. A. Ahmed, S. M. El-Raghy, "Effect of Aging Time at Low Aging Temperatures on The Corrosion of Aluminum Alloy 6061," *Corrosion Science*, vol. 54, pp. 167-173, 2012.
- [46] S. Tabibian, E. Charkaluk, A. Constantinescu, G. Guillemot, F. Szymyka, "Influence of Process-Induced Microstructure on Hardness of Two Al-Si Alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 646, pp. 190-200, 2015.
- [47] F. Kamali, M. Azadi, "An Evaluation of Tribological and Mechanical Properties of Al-Si-Cu Alloy with Nano-Clay Particles Reinforcement," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 19-20, pp. 7062-7076, 2019.
- [48] Z. Qian, X. Liu, D. Zhao, G. Zhang, "Effects of Trace Mn Addition on The Elevated Temperature Tensile Strength and Microstructure of A Low-Iron Al-Si Piston Alloy," *Materials Letters*, vol. 62, no. 14, pp. 2146-2149, 2008.
- [49] M. Azadi, M. M. Shirazabad, "Heat Treatment Effect on Thermo-Mechanical Fatigue and Low Cycle Fatigue Behaviors of A356.0 Aluminum Alloy," *Materials and Design*, vol. 45, pp. 279-285, 2013.
- [50] S. Khisheh, M. Azadi, V. Z. Hendoabadi, M. S. A. Parast, G. Winter, B. Seisenbacher, F. Gruen, K. Khalili, "Influence of T6 Heat-Treating and Over-Ageing on Out-of-Phase Thermo-Mechanical Fatigue Behaviors of Al-Si-Cu Alloy," *Materials Today Communications*, pp. 104803, 2022.
- [51] S. Rezanezhad, M. Azadi, M. Azadi, "Influence of Heat Treatment on High-Cycle Fatigue and Fracture Behaviors of Piston Aluminum Alloy Under Fully-Reversed Cyclic Bending," *Metals and Materials International*, vol. 27, no. 5, pp. 860-870, 2021.
- [52] W. Shi, B. Gao, G. Tu, S. Li, Y. Hao, F. Yu, "Effect of Neodymium on Primary Silicon and Mechanical Properties

- of Hypereutectic Al-15%Si alloy,” *Journal of Rare Earths*, vol. 28, pp. 367-370, 2010.
- [53] M. Azadi, S. Rezanezhad, M. Zolfaghari, M. Azadi, “Effect of Simultaneous Use of Silica Nanoparticles and Heat Treatment on High-Cycle Bending Fatigue Lifetime in Piston Aluminum Alloy,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1463-1473, 2020, (In Persian).
- [54] M. Garat, and G. Laslaz, *Improved Aluminium Alloys for Common Rail Diesel Cylinder Heads*, Engineering, 2007.
- [55] J. Feng, B. Ye, L. Zuo, R. Qi, Q. Wang, H. Jiang, R. Huang, W. Ding, “Effects of Ni Content on Low Cycle Fatigue and Mechanical Properties of Al-12Si-0.9Cu-0.8Mg-xNi at 350°C,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 706, pp. 27-37, 2017.
- [56] M. Zhu, Z. Jian, G. Yang, Y. Zhou, “Effects of T6 Heat Treatment on The Microstructure, Tensile Properties, and Fracture Behavior of The Modified A356 alloys,” *Materials and Design*, vol. 36, pp. 243-249, 2012.
- [57] M. Azadi, “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, pp. 303-314, 2017.
- [58] M. Azadi, H. Bahmanabadi, F. Gruen, G. Winter, B. Seisenbacher, “Cyclic Hardening/Softening Experimental Data in Nano-Clay-Composite and Aluminum Alloy under High-Temperature Strain-Controlled Loading,” *Experimental Results*, vol. 3, pp. e6, 2022.
- [59] E. Ogris, A. Wahlen, H. Lüchinger, P. Uggowitzer, “On The Silicon Spheroidization in Al-Si alloys,” *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 4, pp. 263-269, 2002.
- [60] D. Zhang, L. Zheng, D. St John, “Effect of A Short Solution Treatment Time on Microstructure and Mechanical Properties of Modified Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg alloy,” *Journal of Light Metals*, vol. 2, no. 1, pp. 27-36, 2002.
- [61] V. S. Krasnikov, A. E. Mayer, V. V. Pogorelko, M. R. Gazizov, “Influence of  $\theta'$  Phase Cutting on Precipitate Hardening of Al-Cu Alloy during Prolonged Plastic Deformation: Molecular Dynamics and Continuum Modeling,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 4906, 2021.
- [62] M. S. A. Parast, M. Azadi, “Effect of Nano-Clay Particles and Heat Treating on Pure and Fretting Fatigue Properties of Piston Aluminum Alloy under Stress-Controlled Cyclic Bending Loading,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 7, pp. 5927-5942, 2022.
- [63] P. Liu, J. Y. Hu, H. X. Li, S. Y. Sun, Y. B. Zhang, “Effect of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Corrosion Resistance of 7075 Al Alloys Fabricated by SLM,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 60, pp. 578-585, 2020.
- [64] K. N. Obiekea, S. Y. Aku, D. S. Yawas, “Effects of Pressure on The Mechanical Properties and Microstructure of Die Cast Aluminum A380 alloy,” *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 2, no. 03, pp. 248, 2014.
- [65] S. J. S. Chelladurai, R. Arthanari, “Prediction of Hardness of Stir Cast LM13 Aluminum Alloy - Copper Coated Short Steel Fiber Reinforced Composites using Response Surface Methodology,” *Materials Science and Engineering Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 221-229, 2020.
- [66] M. Azadi, M. S. A. Parast, “Data Analysis of High-Cycle Fatigue Testing on Piston Aluminum-Silicon Alloys under Various Conditions: Wear, Lubrication, Corrosion, Nano-Particles, Heat-Treating, and Stress,” *Data in Brief*, vol. 41,

- pp. 107984, 2022.
- [67] S. I. Talabi, S. O. Adeosun, A. F. Alabi, I. N. Aremu, S. Abdulkareem, "Effects of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Al-4% Ti Alloy," *International Journal of Metals*, vol. 2013, pp. 127106, 2013.
- [68] V. Gadpale, P. N. Banjare, M. K. Manoj, "Effect of Ageing Time and Temperature on Corrosion Behaviour of Aluminum Alloy 2014," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 338, pp. 012008, 2018.
- [69] E. F. A. Zeid, "Influence of Aging Temperature on Precipitation Kinetics, Morphology and Hardening Behavior of Al-7475 Alloy," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 7, pp. 6621-6629, 2019.
- [70] J. Pezda, "Effect of Shortened Heat Treatment on The Hardness and Microstructure of 320.0 Aluminium Alloy," *Archives of Foundry Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 27-30, 2014.
- [71] N. Awad, H. Niu, U. Ali, Y. Morsi, T. Lin, "Electrospun Fibrous Scaffolds for Small-Diameter Blood Vessels: A Review," *Membranes*, vol. 8, no. 1, p. 15, 2018.
- [72] Z. Y. Li, X. L. Liu, G. Q. Wu, W. Sha, "Observation of Fretting Fatigue Cracks of Ti6Al4V Titanium Alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 707, pp. 51-57, 2017.

