



## Investigation of the effect of alumina nanoparticle on stir casting method parameters on mechanical properties of aluminum-based nanocomposites

Reza Rashidi Meybodi <sup>a\*</sup>, Ali Dehghan Hamadan <sup>b</sup>, Mohammad Reza Babaei Zarch <sup>c</sup>, Masoud Mahdizadeh Rokhi <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran

<sup>b</sup> Yazd Desert Nanoalloy Cooperative Company, Yazd, Iran

<sup>c</sup>Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>d</sup>Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Rashidi Meybodi R, Dehghan Hamadan A, Babaei Zarch M R, Mahdizadeh Rokhi M. Investigation of the effect of alumina nanoparticle on stir casting method parameters on mechanical properties of aluminum-based nanocomposites. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(3):479-496.

 <https://10.61186/masm.4.3.479>

### KEYWORDS

Mechanical properties, Nanocomposites, Alumina nanoparticle, Stir casting method.

### ABSTRACT

Metal matrix nanocomposites are materials with various and diverse properties that are somewhat controllable, and for this reason, there is today a growing effort to apply them in different industries. In this regard, significant research has been conducted to manufacture, develop, and improve their properties, leading to the creation of new methods for fabricating these materials. One such method is the modified stir casting process. In this study, based on the modified stir casting method, aluminum matrix nanocomposites of "A357" reinforced with alumina nanoparticles at weight percentages of 0.5%, 1%, and 1.5% were fabricated under different conditions such as cooling rate of the melt and alloy state. Properties such as hardness, tensile strength, yield strength, elongation at yield, elongation at fracture, Young's modulus, fracture toughness, and work hardening were investigated. Based on the results obtained, it was found that adding alumina nanoparticles to A357 aluminum results in a nanocomposite with mechanical properties significantly superior to the base alloy. Among the nanocomposites fabricated under various conditions, the highest yield strength was observed in the nanocomposite reinforced with alumina nanoparticles at a weight percentage of 1%, and the best tensile strength was found in the nanocomposite reinforced with alumina nanoparticles at a weight percentage of 0.5% under conditions where the alloy was modified with an admixture in a semi-solid state and cast with a low cooling rate.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

**M**etal matrix composites reinforced with nanoparticles are called metal matrix nanocomposites. When the particles become very small, the interaction between nanoparticles and dislocations becomes more important and they have a great impact on the strengthening mechanisms in composites and improve the mechanical properties of the composite [1]. The efficiency of the modified vortex casting method for manufacturing magnesium and aluminum based nanocomposites has been proven and it is of great importance due to its greater flexibility than other methods based on vortex casting. In this method, active elements can be used in

\* Corresponding author. Tel.: 03533212300

E-mail address: [rashidi@meybod.ac.ir](mailto:rashidi@meybod.ac.ir)

DOI: <https://10.61186/masm.4.3.479>

Received: August 13, 2024; Received in revised form: December 11, 2024; Accepted: December 19, 2024.

© Author



the powder mixture, and in this way, the wettability of nanoparticles by the melt can be improved, and by adding the powder mixture to the complete melt and using the stirring action, the nanocomposite material can be obtained.

Rashidi Meybodi et al. also investigated the effect of adding clay nanoparticles [15] and magnesium oxide nanoparticles [16] on the mechanical properties of aluminum matrix composites produced by vortex casting.

The purpose of the current research is to investigate the effect of alumina nanoparticles on the properties of cast aluminum nanocomposites "A357". For this purpose, alumina nanoparticles with weight percentages of 0.5, 1 and 1.5% were made under different conditions such as different cooling rates of the melt and different states of the alloy, and the properties of hardness, tensile strength, yield strength, length change in Yield, elongation at break, Young's modulus, fracture toughness, and toughness have been investigated.

## 2. Stir casting method

The most important parameters of this method are stirring speed, cooling speed, nanoparticle percentage, melt temperature and how to add nanoparticles to the melt. In this research, a constant stirring speed of 750 rpm is selected. In order to change the cooling speed, two separate graphite molds are prepared, one of which is heated to 200 degrees and the other remains at room temperature, and then the melt is poured into both molds. Also, nanoparticles with three different percentages, 0.5%, 1% and 1.5%, have been used. The temperature of the melt is constant at 820 degrees Celsius. To add nanoparticles, first, a mixture of nanoparticles and magnesium was prepared and the nanoparticles were added to the melt through Amixan powders. Hardness and tensile tests are used to check the effectiveness of the mentioned method in inoculating nanoparticles into the melt and also to check the improvement of the properties. These investigations have been done for various nanocomposites and base alloy in cast state.

## 3. Preparation of test specimen

In this research, "A357" alloy is selected as the basis of nanocomposite. This material is one of Al-Si casting alloys, which is widely used in military, aerospace and automotive industries. Also, in this research, alumina nanoparticles ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) of the alpha type with a purity of more than 99% and an average size of 80 nm with three different weight percentages have been used.

The specimens needed for the hardness test are cut from the ends of the small cylinders formed next to the main specimen with a height of 1 cm and then polished in several steps and the Brinell hardness test is performed on them. The large cylinders, which are the main specimens, are also turned into the standard specimen form for the mechanical tensile test through turning and are subjected to the tensile test. These tests were performed using a Centam brand tensile testing machine in accordance with ASTM A370 standard in Yazd University Mechanics Laboratory.

## 4. The experimental results

Figure 1 is the SEM images taken from pure aluminum alloy "A357" which were taken at magnifications of 1000, 10000 and 30000 times. The pictures are of a sample that was presented under the conditions of low cooling rate of casting. The images in Figure 2 show the layered eutectic phase with coarse silicon layers (white spots in Figure 2-c), which can be one of the reasons for the weaker tensile strength of the pure alloy compared to nanocomposites.

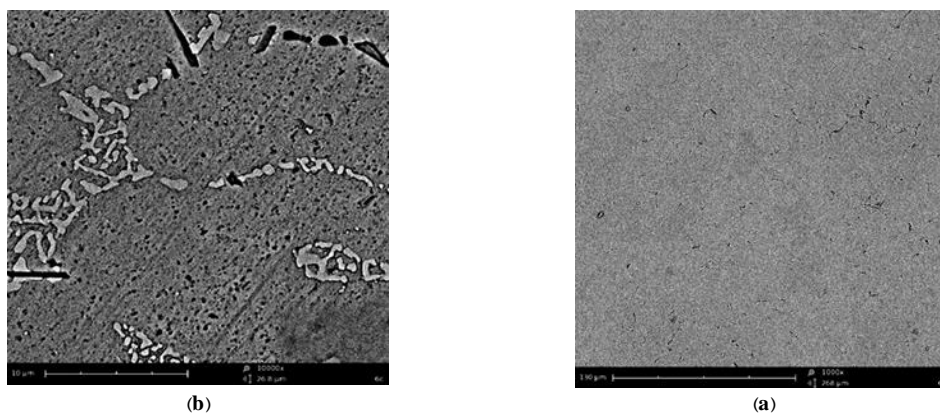
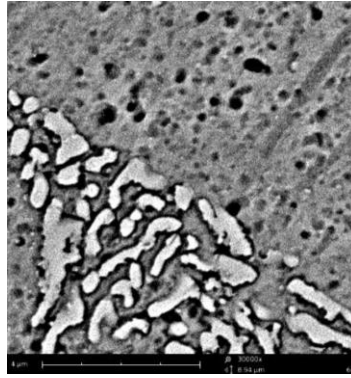


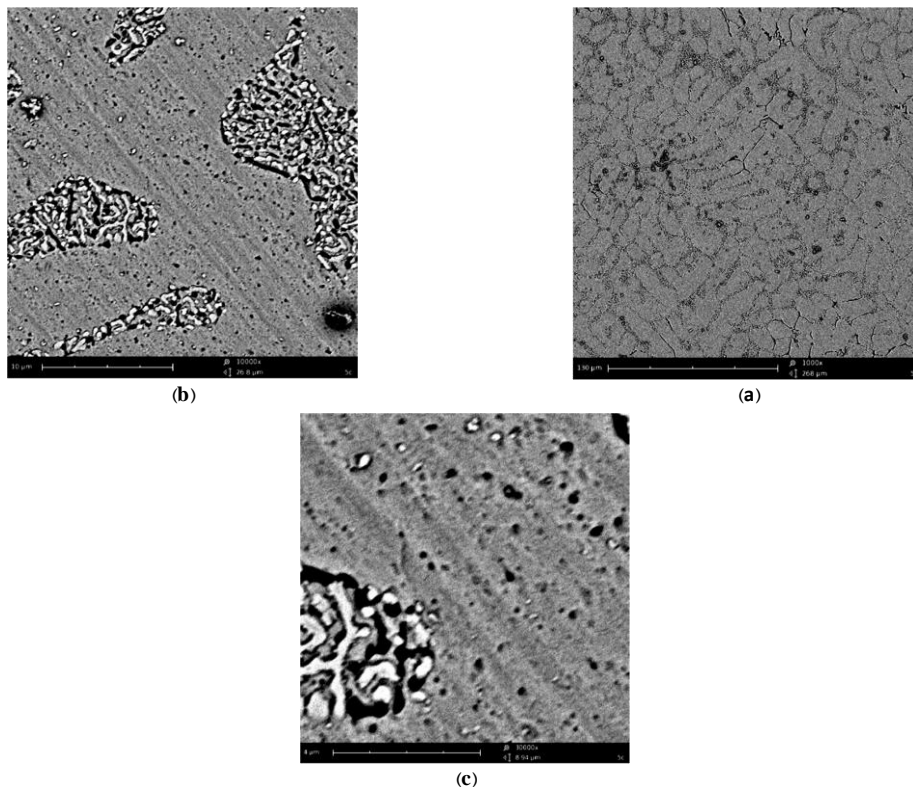
Figure 1. SEM image of pure alloy "A357" with magnifications a) 1000, b) 10000



(c)

Figure 1. SEM image of pure alloy "A357" with magnifications c) 30000 times

Figure 2 includes SEM images of "A357" alloy reinforced with 1% by weight of alumina, which was cast by adding amizan to the molten alloy in a semi-solid state and with a low cooling rate. In the pictures, it is evident that the silicon in the eutectic phase is finer and also the presence of nanoparticles in the dendrites and the eutectic phase.



(b)

(a)

(c)

Figure 2. SEM image of 1% alumina nanocomposite, magnifications a) 1000, b) 10000, c) 30000 times

The hardness diagram of aluminum matrix nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles is shown in Figure 3. It can be seen that for all three cases of 0.5%, 1% and 1.5% by weight of alumina added to the melt, the best hardness belongs to adding amizan to the base alloy in a semi-solid state and casting with a low cooling rate, and also the highest hardness number belongs to the sample with 1.5% by weight of alumina.

Figure 4 shows the yield stress diagram of aluminum-based nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles. For all three cases of 0.5, 1 and 1.5% by weight of alumina added to the melt, the highest yield strength belongs to the addition of amizan to the base alloy in a semi-solid state and casting with a low cooling rate, and also the highest strength the yield of the sample has 1% by weight of alumina.

The ultimate stress diagram of aluminum matrix nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles is shown in Figure 5. It can be seen that for the case of 0.5% by weight of alumina added to the melt, the highest final tensile strength belongs to the addition of Amizan to the base alloy in a semi-solid state and casting with a low cooling rate, and for 1 and 1.5% by weight Alumina added to the melt has the highest tensile

strength of adding Amizan to the base alloy in the state of complete melting and casting with a low cooling rate, and also the highest final tensile strength of the sample with 0.5% by weight of alumina.

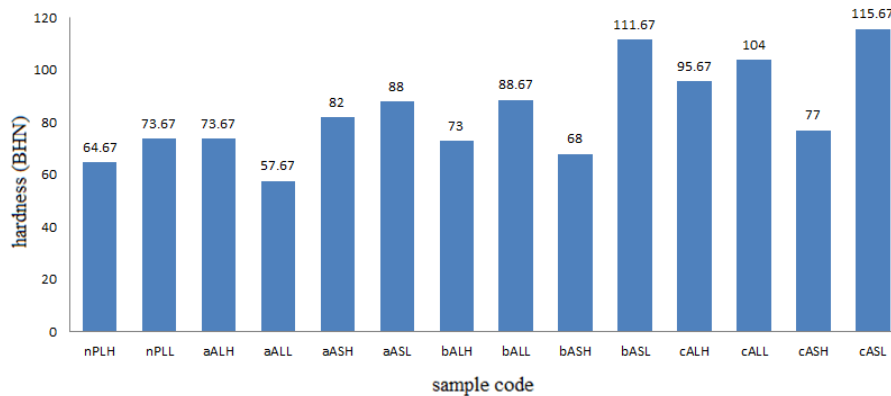


Figure 3. Hardness graph of aluminum matrix nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles

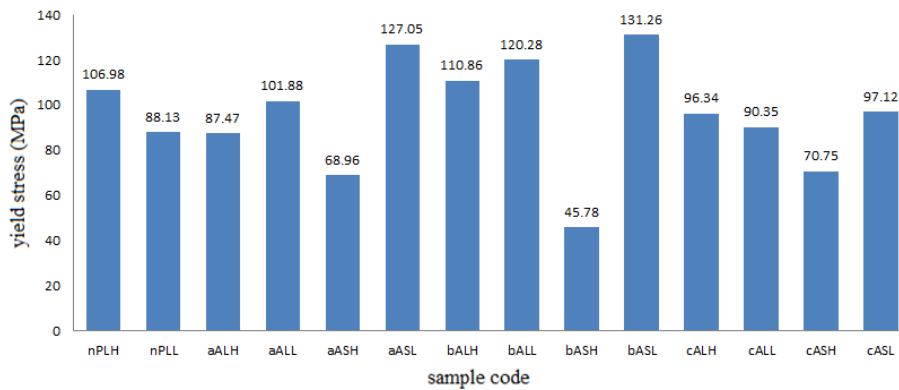


Figure 4. Yield stress diagram of aluminum nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles

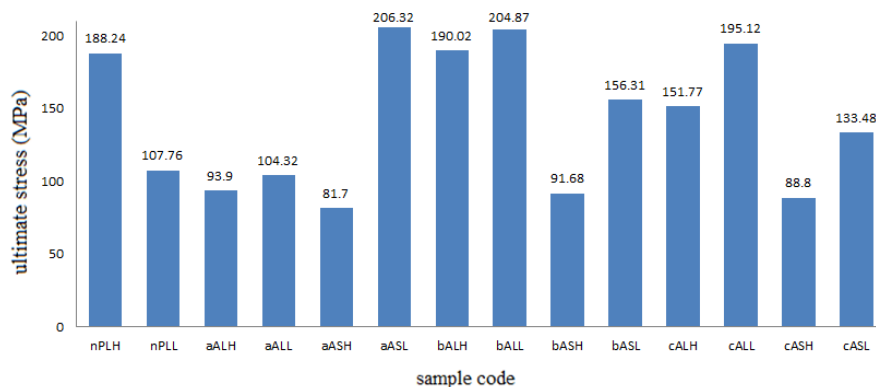


Figure 5. Ultimate stress diagram of aluminum matrix nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles

Figure 6 shows the diagram of Young's modulus of aluminum matrix nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles. For all three cases of 0.5, 1 and 1.5% by weight of alumina added to the melt, the highest Young's modulus belongs to the addition of amizan to the base alloy in a semi-solid state and casting with a low cooling rate, and also the highest Young's modulus of the sample has 0.5 wt% alumina.

The graph of the percentage change of length to initial length at the yield stress point of the aluminum-based nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles can be seen in Figure 7. It is clear that for the case of 0.5 and 1.5% by weight of alumina added to the melt, the biggest change in the length at the yield strength point belongs to the addition of Amigane to the base alloy in the state of complete melting and casting with high cooling rate, and for 1% by weight of alumina added to the melt, the largest change in length at the yield strength point belongs to the addition of amizan to the base alloy in the state of complete melting and casting with a low cooling

rate, and also the largest change in length at the strength point The yield of the sample has 1% by weight of alumina.

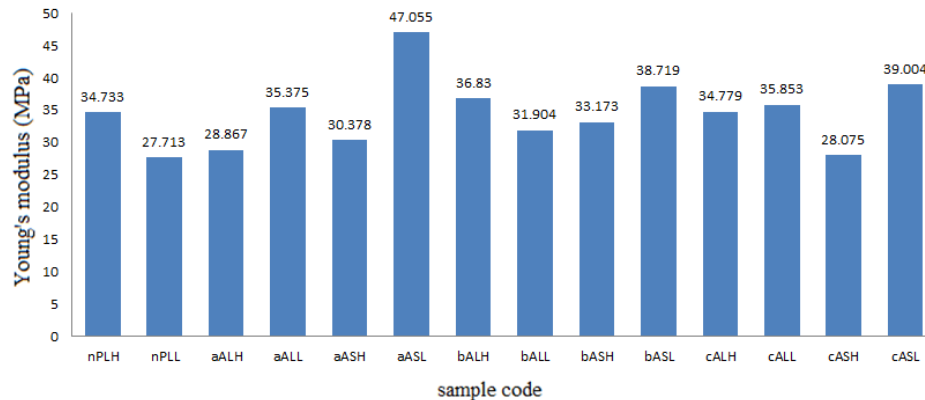


Figure 6. Young's modulus of aluminum-based nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles

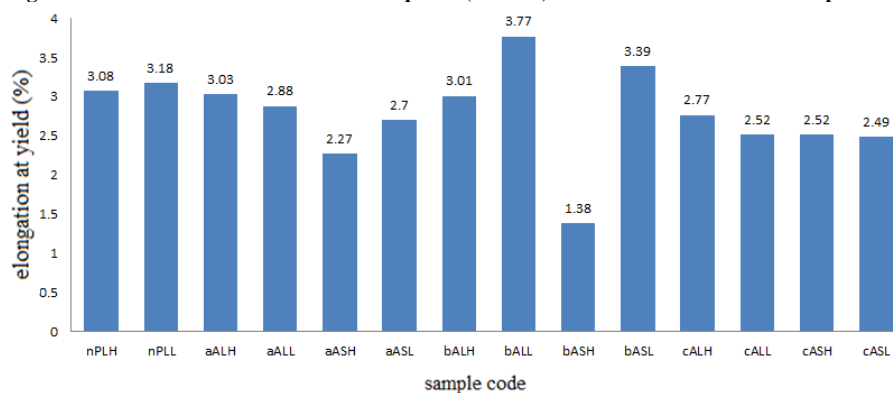


Figure 7. The percentage change of length to initial length at the yield stress point of aluminum matrix nanocomposite ("A357") reinforced with alumina nanoparticles

## 5. Conclusion

Adding alumina nanoparticles to molten alloy in semi-solid state generally improves the yield strength and ultimate strength of aluminum-based nanocomposite. Also, the casting of this kind of nanocomposites with a low cooling rate produces better mechanical properties than the casting with a high cooling rate, which can also be due to the longer time of solidification and as a result, the release of some gases. And oxide films trapped in the nanocomposite and because of the better substitution of nanoparticles. Also, by examining the results, it has been determined that in the samples with 1% by weight of alumina nanoparticles, the best improvement in mechanical properties is created and at 1.5% by weight, the yield strength and final strength decrease compared to 1% by weight. It can be due to the clustering of alumina nanoparticles and the low resistance of the clusters against mechanical stresses. Also, the highest Young's modulus of the sample has 0.5 wt% alumina.



## بررسی اثر نانو ذره آلومینا و پارامترهای روش ریخته‌گری گردابی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی

رضا رشیدی میبیدی<sup>الف\*</sup>، علی دهقان همدان<sup>ب</sup>، محمدرضا بابائی زارچ<sup>ج</sup>، مسعود مهدی زاده رخی<sup>د</sup>

<sup>الف</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبد، میبد، ایران، [rashidi@meybod.ac.ir](mailto:rashidi@meybod.ac.ir)

<sup>ب</sup> شرکت تعاونی نانوالیاز کویر یزد، یزد، ایران، [ali\\_deh@yahoo.com](mailto:ali_deh@yahoo.com)

<sup>ج</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، [babaeeme@gmail.com](mailto:babaeeme@gmail.com)

<sup>د</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، [mmrokhi@shahroodut.ac.ir](mailto:mmrokhi@shahroodut.ac.ir)

واژگان کلیدی	چکیده
خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت، نانو ذره آلومینا، ریخته‌گری گردابی.	نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی موادی با خواص مختلف و متنوع و تاحدی قابل کنترل هستند و به همین دلیل امروزه تلاش می‌گردد تا کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف عملی شود. در این راستا برای ساخت، توسعه و بهبود خواص آن‌ها تحقیقات زیادی صورت گرفته که منجر به ایجاد روشهای جدیدی برای ساخت این مواد شده است. یکی از این روش‌ها، روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده است. در این تحقیق با مبنا قراردادن روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده، نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم "A357" تقویت شده با نانوذرات آلومینا با درصد وزنی های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد تحت شرایط مختلف نظیر سرعت سرد شدن مذاب و حالت آلیاژ، ساخته شده و خصوصیات نظیر سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم، تغییر طول در هنگام تسلیم، تغییر طول در هنگام شکست، مدول یانگ، چقرمگی شکست و کارسختی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که با افزودن نانوذرات آلومینا به آلومینیوم A357، نانوکامپوزیتی به وجود می‌آید که خواص مکانیکی آن به مراتب بهتر از آلیاژ پایه است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹	

### ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی که با نانوذرات تقویت شده‌اند را نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌گویند. هنگامی که ذرات بسیار ریز می‌شوند، اثر متقابل نانوذرات و نابعایی‌ها مهم‌تر شده و تأثیر زیادی روی مکانیزم‌های استحکام‌بخشی در کامپوزیت‌ها می‌گذارند و خواص مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشند [۱]. مشکل اصلی که در ساختن نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد، کم بودن ترشوندگی نانوذرات سرامیکی با مذاب زمینه فلزی است که باعث می‌شود ریخته‌گری به روش‌های متداول قابل انجام نباشد. ذرات ریز تمایل دارند تا خوشه‌ای شده و در یک جا جمع شوند که این امر باعث از بین رفتن یکنواختی توزیع در زمینه و عدم بهره‌برداری بهینه از پتانسیل تقویت‌کنندگی نانوذرات شود [۲]. عواملی نظیر اندازه نانوذرات، نوع ذرات و دمیدن گاز خنثی در هنگام ریخته‌گری می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در فرآیند تولید داشته باشد [۱]. امروزه از نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم ساخته شده به واسطه بهبود خواص سختی و استحکام کششی، در صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودرو که نسبت استحکام به وزن اهمیت ویژه‌ای دارد استفاده می‌شود ولی به دلیل قیمت بالای آلومینیوم و خواص مکانیکی نامناسب آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم در دماهای بالا استفاده از آن را محدود می‌کند. از این‌رو محققین با توسعه کامپوزیت‌های مختلف زمینه آلومینیوم سعی در رفع عیب مذکور داشتند؛ اما در این کامپوزیت‌ها اگرچه استحکام بالاتر از آلیاژ زمینه است ولی افزایش استحکام در کنار کاهش خواص دیگر همچون شکل‌پذیری دیده شده است. با بروز فناوری نانو و ساخت نانوکامپوزیت‌های مختلف

مشخص شد که نانوکامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ پایه از استحکام ویژه بالاتر، شکل‌پذیری حداقل برابر با آلیاژ زمینه، چقرمگی بهتر، مقاومت به سایش و مقاومت به خزش عالی برخوردار می‌باشند. میزان افزایش استحکام در این نانوکامپوزیت‌ها بسیار بیشتر از کامپوزیت‌های مرسوم تقویت‌شده با ذرات میکرونی است و در درصد‌های وزنی یا حجمی بسیار کم (کمتر از ۳٪) تقویت‌کننده به دست می‌آید [۳-۹]. با توجه به خواص جالب توجه نانوکامپوزیت‌ها تلاش‌های بسیاری صورت گرفت تا فرآیند تولید نانوکامپوزیت‌ها تجاری شود. حاصل این کوشش‌ها به وجود آمدن روش‌های مختلف برای تولید نانوکامپوزیت‌های حجیم است.

با وجود حجم بسیار زیاد تحقیقات صورت گرفته در رابطه با ساخت نانوکامپوزیت‌های حجیم، تعداد روش‌های موجود برای تولید قطعات مهندسی پیچیده، بسیار اندک و انگشت‌شمار است. بسیاری از روش‌های کنونی تنها قابلیت تولید شکل‌های ساده را دارند و افزایش مقیاس برخی دیگر نیز بسیار مشکل است. در میان عوامل مختلف، مهم‌ترین عوامل تجاری نشدن ساخت نانوکامپوزیت‌ها، فقدان یک روش اقتصادی برای تولید این مواد و قیمت بالای نانومواد است. از بین روش‌های موجود، فرآیندهای مبتنی بر انجماد از شانس بیشتری برای تولید مقرون‌به‌صرفه و انبوه قطعات مهندسی برخوردار می‌باشند [۴-۹]. تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با استفاده از فرآیندهای مبتنی بر انجماد در برگیرنده دو مرحله مهم است. مرحله اول، تهیه مخلوط مذاب - نانوذرات، به نحوی که نانوذرات به‌صورت ذرات مجزا و یکنواخت در مذاب معلق شده باشند و مرحله دوم، کنترل شرایط انجماد به نحوی که نانوذرات در زمینه‌ی نانوکامپوزیت نهائی به‌صورت یکنواخت پراکنده شده باشند؛ یا به‌عبارت‌دیگر فراهم کردن شرایط انجماد برای دربرگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد است. با بررسی منابع موجود مربوط به ساخت نانوکامپوزیت‌های مختلف با استفاده از روش‌های مبتنی بر انجماد مشخص می‌شود که مهم‌ترین و مشکل‌ترین مرحله برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها، مرحله اول می‌باشد که علت آن، ترشوندگی ضعیف نانوذرات توسط مذاب فلزات و کافی نبودن نیروهای موجود برای شکستن خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات مربوط است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، مرحله دوم یعنی دربرگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد، مشکلی برای ساخت محسوب نمی‌شود. در حقیقت یکی از موضوعات حل نشده در خصوص تولید نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از روش‌های مذکور، مکانیزم دربرگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد در سرعت‌های انجماد بسیار کمتر از سرعت‌های انجماد مورد نیاز برای دربرگرفته شدن ذرات میکرونی توسط جبهه انجماد است. بنابراین می‌توان گفت که بیشتر فعالیت‌های صورت گرفته در رابطه با ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با کمک این نوع روش‌ها بر روی مرحله اول متمرکز شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش حباب‌سازی مافوق صوت و روش ریخته‌گری گردابی اشاره کرد.

روش حباب‌سازی مافوق صوت قابلیت فوق‌العاده‌ای در تولید نانوکامپوزیت‌های ریختگی زمینه آلومینیوم و منیزیم دارد، اما با بررسی ریزساختار این نانوکامپوزیت‌ها مشاهده شده است که هنوز خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات در زمینه حضور دارند. استفاده از توان‌های بالا و زمان‌های طولانی بر روی مخلوط مذاب - نانوذرات که موجب آلوده شدن مذاب توسط ماده به‌کاررفته در ساخت پروب، کاهش عمر پروب و مصرف انرژی بالا در این روش شده و همچنین کاهش اثرات غیرخطی امواج مافوق صوت در مذاب با دور شدن از نوک پروب که باعث مشکلات بسیاری در افزایش مقیاس شده را می‌توان از معایب این روش بیان کرد [۴-۶].

در روش ریخته‌گری گردابی، با توجه به عدم توانایی این روش در شکستن کلوخه‌ها و خوشه‌های موجود در پودر خام نانوذرات، محققین برای ساخت مخلوط مناسب مذاب - نانوذرات، از روش‌ها و راهکارهایی نظیر بهبود ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب از طریق افزودن عناصر فعال به مذاب، ایجاد پوشش مناسب بر روی سطح نانوذرات [۱۰]، شکستن کلوخه‌ها از طریق افزودن نانوذرات به مذاب خمیری [۱۱] و اختلاط تحت فشار پودر نانوذرات خام با پودر یک فلز نرم [۳، ۸ و ۹] استفاده کرده‌اند.

در خصوص ریخته‌گری گردابی اصلاح شده که کارایی آن برای ساخت نانوکامپوزیت‌های پایه منیزیم و آلومینیوم به اثبات رسیده، به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر ریخته‌گری گردابی از اهمیت بالا برخوردار است. در این روش می‌توان در مخلوط پودر از عناصر فعال استفاده کرد و از این طریق ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب را بهبود بخشید و با افزودن مخلوط پودر به مذاب کامل و با استفاده از عمل همزدن می‌توان به ماده نانوکامپوزیت دست یافت. مانند بقیه روش‌ها، در این روش نیز حذف کامل خوشه‌های نانوذرات تاکنون گزارش نشده است [۳، ۸] و [۹].

در ادامه چند نمونه از آخرین تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. هریستا و همکاران اثر افزودن

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بر ویژگی‌های کامپوزیت‌های تقویت شده A356 را بررسی کردند [۱۲]. آن‌ها سعی داشتند با افزودن Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به‌عنوان تقویت‌کننده با کسر حجمی‌های متفاوت از ۲ تا ۱۵ درصد و با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی، مقدار بهینه افزودنی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> جهت تقویت و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت را تعیین کنند. آن‌ها در نهایت توانستند مقدار افزودنی مناسب برای افزایش سختی کامپوزیت را به دست آورند.

حداد و همکاران [۱۳] با توجه به ویژگی‌های ذرات کربنی، از نانوصفحه‌های گرافن و نانولوله‌های کربنی به‌عنوان ذرات تقویت‌کننده با درصد‌های وزنی ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ در آلیاژ اولیه A356 استفاده کردند. آن‌ها از همزن گرافیتی با سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه، در حالت پیوسته در دمای ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ دقیقه استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که استحکام کششی و فشاری در نتیجه افزایش مقادیر تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش ۲۸ و ۵۵ درصد به ترتیب برای مقاومت کششی و فشاری با استفاده از ۰/۱ درصد وزنی گرافن گزارش شد. همچنین نانولوله کربنی با ۰/۱ درصد وزنی منجر به افزایش سختی نانوکامپوزیت به میزان ۳۳ درصد نسبت به آلیاژ بدون تقویت‌کننده شد.

پراکاش و مانیماران [۱۴] به بررسی اثرات افزودن کاربید سیلیکون (SiC) به آلیاژ Al6061 پرداختند. کامپوزیت‌ها با فرآیند ریخته‌گری گردابی و با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی SiC ساخته شدند. کامپوزیت‌های ساخته شده با آزمایش‌های مورفولوژیکی و مکانیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که افزودن SiC به میزان ۷ درصد وزنی باعث بهبود خواص می‌شود. رشیدی میبیدی و همکاران نیز اثر افزودن نانو ذرات رس [۱۵] و نانوذرات اکسید منیزیم [۱۶] را بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تولید شده به روش ریخته‌گری گردابی بررسی کردند.

هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر نانوذرات آلومینا بر خواص نانوکامپوزیت‌های ریخته‌گری زمینه آلومینیوم "A357" است. به همین منظور نانوذرات آلومینا با درصد وزنی‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد تحت شرایط مختلف نظیر سرعت‌های متفاوت سرد شدن مذاب و حالات مختلف آلیاژ، ساخته شده و خواص سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم، تغییر طول در هنگام تسلیم، تغییر طول در هنگام شکست، مدول یانگ، چقرمگی شکست و کارسختی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- ریخته‌گری گردابی اصلاح‌شده

در فرآیند ریخته‌گری گردابی پارامترهای بسیاری وجود دارند که بر روی توزیع و پخش ذرات تقویت‌کننده در مذاب آلیاژ تأثیرگذارند. گرچه توزیع نهایی ذرات تقویت‌کننده علاوه بر توزیع ذرات در مذاب به شرایط انجماد بستگی دارد ولی توزیع نامناسب ذرات در مذاب سبب بدتر شدن توزیع در قطعه پس از انجماد خواهد شد حتی اگر شرایط انجمادی در بهترین وضعیت باشد. بنابراین قبل از هر چیز باید به موضوع بهینه کردن پارامترهای این فرآیند پرداخته شود. به‌طور کلی این پارامترها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول، پارامترهای مربوط به همزن بوده که مورد توجه بسیاری از محققین است و به روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۷]. این پارامترها شامل نوع همزن، ویژگی‌های هندسی همزن نظیر تعداد تیغه‌های پره همزن، قطر پره، عرض پره، زاویه تیغه پره نسبت به محور همزن، سرعت همزدن، جهت چرخش همزن، موقعیت قرارگیری پره همزن نسبت به کف ظرف یا بوت، زمان همزدن و حضور موج‌گیر در ظرف می‌باشند. گروه دوم، پارامترهای مربوط به مواد که شامل ترکیب آلیاژ، دمای مذاب، حالت مذاب، نوع، اندازه، شکل و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، عملیات گرمائی انجام شده بر روی تقویت‌کننده قبل از افزودن آن‌ها به مذاب، جنس قالب و عملیات گرمائی انجام شده بر روی قالب و اتمسفر کوره است. این پارامترها بر روی گرانیوی مخلوط مذاب و ذرات، ترشوندگی ذرات توسط مذاب، نحوه انجماد کامپوزیت، واکنش شیمیائی ذرات با مذاب و ... تأثیرگذار می‌باشند [۱۸].

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تأثیر نانوذرات بر خواص نانوکامپوزیت‌های ریخته‌گری زمینه آلومینیوم است، بنابراین قبل از هر چیز بایستی از عوامل تأثیرگذار بر نحوه توزیع نانوذرات در این روش اطلاع داشت.

از مهم‌ترین پارامترهای این روش سرعت هم‌زدن، سرعت سردشدن، درصد نانوذره، دمای مذاب و نحوه افزودن نانوذرات به مذاب است. در این تحقیق سرعت هم‌زدن یک مقدار ثابت، ۷۵۰ دور بر دقیقه، انتخاب شده است. برای تغییر سرعت سرد شدن

به این صورت عمل شده که دو قالب گرافیتی مجزا تهیه گردیده که یکی تا دمای ۲۰۰ درجه گرم شده و دیگری در دمای محیط باقی می ماند و سپس مذاب در هر دو قالب ریخته می شود. همچنین از نانوذرات با سه درصد مختلف، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد، استفاده شده است. دمای مذاب روی ۸۲۰ درجه سانتی گراد ثابت می باشد. برای اضافه کردن نانوذرات ابتدا آمیزانی از نانوذرات و منیزیم تهیه شده و نانوذرات از طریق پودرهای آمیزان<sup>۱</sup> به مذاب افزوده شده اند. برای بررسی مؤثر بودن روش مذکور در تلقیح نانوذرات به مذاب و همچنین بررسی میزان بهبود خواص، از آزمون های سختی سنجی و کشش استفاده می شود. این بررسی ها برای نانوکامپوزیت های مختلف و آلیاژ زمینه در حالت ریختگی صورت گرفته است.

### ۳- روش ساخت نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی

در این تحقیق، آلیاژ A357 با ترکیب عنصری مشخص شده در جدول ۱ به عنوان زمینه نانوکامپوزیت انتخاب شده است. این ماده از جمله آلیاژهای ریختگی Al-Si است که در صنایع نظامی، هوافضا و خودروسازی کاربرد فراوان دارد.

جدول ۱ ترکیب عنصری آلیاژ زمینه A357

Mg	Si	Ti	Be	Al
۰/۶۰	۷/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۹۲/۲۵

همچنین در این پژوهش از نانوذره آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) از نوع آلفا با خلوص بالای ۹۹ درصد و اندازه متوسط ۸۰ نانومتر با سه درصد وزنی مختلف استفاده شده است.

همان طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، برای تزریق ابتدا مخلوطی از نانوذرات و یک پودر فلزی تهیه و سپس مخلوط حاصل به مذاب افزوده می شود. در اینجا از یک نوع مخلوط پودری یا آمیزان استفاده می شود. آمیزان از پودر منیزیم و ۲۰ درصد وزنی نانوذره تشکیل شده است. برای ساخت آمیزان ابتدا پودرهای نانوذرات به میزان موردنظر به ۲۵۰ سی سی الکل اتانول ۹۶ درصد اضافه شده و مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک<sup>۲</sup> همگن سازی می گردد. سپس پودر منیزیم به اندازه موردنظر کم کم به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک همگن سازی می گردد. در نهایت مخلوط به دست آمده به مدت ۱ ساعت اولتراسونیک می شود. برای تهیه آمیزان از دستگاه آسیاب پر انرژی برند Attritor استفاده شده است. آسیابکاری در سرعت ۴۴۸ دور بر دقیقه با فرکانس ۱۶ هرتز، در دمای ۷- درجه سانتی گراد و مدت زمان ۹۰ دقیقه انجام گرفته است. نسبت وزنی گلوله ها به پودر ۲۰ و وزن پودر ۵۰ گرم در نظر گرفته شده است. آسیابکاری در حالی که محفظه آسیاب توسط جریان مداوم آب خنک می شود، صورت گرفته است. پس از اتمام این مرحله، مخلوط حاصل در آون و در دمای ۶۵ درجه به مدت ۵ روز قرار گرفته تا تمام الکل موجود در آن خشک شده و سپس پودر آمیزان تهیه گردد.

برای ساخت نمونه نانوکامپوزیت ۰/۵ درصد وزنی ابتدا محاسبات مربوطه صورت گرفته است. فرض کنید کسر وزنی نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی b و در پودر آمیزان a باشد. بنابراین برای ساخت نانوکامپوزیت، دو رابطه زیر که مبتنی بر قانون بقای جرم است با در نظر گرفتن عدم تلفات آلیاژ و نانوذرات باید تأمین گردد:

$$W_t = W_{mp} + W_{alloy} \quad (1)$$

$$b = W_{np} / W_t \quad (2)$$

در روابط فوق،  $W_t$ ،  $W_{mp}$  و  $W_{alloy}$  و  $W_{np}$  به ترتیب وزن کل نانوکامپوزیت، وزن پودر آمیزان، وزن آلیاژ و وزن نانو ذرات آلومینا است. با استفاده از رابطه بین  $W_{mp}$  و  $W_{np}$  که به صورت  $W_{np} = a W_{mp}$  است و حل هم زمان روابط (۱) و (۲) رابطه ای به صورت زیر برای محاسبه وزن پودر آمیزان حاصل خواهد شد:

$$W_{mp} = b W_{alloy} / (a-b) \quad (3)$$

برای هر مرحله ساخت نانوکامپوزیت یک درصد معین نانو ذره آلومینا و ۲۵۰ گرم شمش آلومینیوم A357 انتخاب کرده و در بوته گرافیتی قرار داده تا در کوره ذوب شود. ابتدا آلومینیوم تا دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد حرارت داده می شود تا ذوب کامل

<sup>1</sup> Amixan powders

<sup>2</sup> Ultrasonic

شود و همه نقاط مذاب به یک ساختار مولکولی واحد برسند و سپس تا دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد با گذشت زمان و کاهش حرارت کوره سرد می‌شود تا آلومینیوم به صورت نیمه‌جامد یا خمیری درآید. سپس آمیزان از طریق قیف تزریق و تحت گاز آرگون به مذاب اضافه شده و با هم‌زن، دریل دیجیتالی با پره گرافیتی ۴ پره با زاویه ۴۵ درجه پادساعت‌گرد، به هم زده می‌شود. این فرآیند بسته به درصد نانوذره تزریقی از ۲۰ دقیقه تا ۱ ساعت متغیر است. پس از اتمام تزریق پودر آمیزان، دما تا ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد که دمای ذوب آلومینیوم است بالا می‌آید و دوباره به هم زده می‌شود. پس از آن دما را دوباره بالا برده و یک‌بار در ۷۵۰ درجه و یک‌بار در ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد آن را به هم زده و سپس مذاب در دو قالب گرافیتی مجزا، که یکی تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده و دیگری هم دما با محیط است، ریخته می‌شود. چند دقیقه پس از انجماد، قالب با دمای پایین را باز کرده و نمونه‌های ریخته‌گری شده در هوای محیط قرار می‌گیرد تا سرعت سرد شدن آن تقریباً ثابت بماند و به قالب پیش‌گرم شده اجازه داده می‌شود تا با نرخ سرد شدن طبیعی خود سرد شود و پس از آن نمونه خارج شده و از این طریق دو نمونه با سرعت‌های سرد شدن متفاوت ایجاد می‌گردد.

#### ۴- تهیه نمونه‌های آزمایش

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمون سختی از انتهای استوانه‌های کوچک شکل گرفته در کنار نمونه اصلی با ارتفاع ۱ سانتی‌متر بریده و سپس در چند مرحله پولیش زده و آزمون سختی‌سنجی برینل<sup>۳</sup> روی آن‌ها انجام می‌شود. استوانه‌های بزرگ که نمونه‌های اصلی هستند نیز از طریق تراشکاری به فرم نمونه استاندارد برای آزمون کشش مکانیکی درآمده و تحت آزمون کشش قرار می‌گیرند. این آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه آزمایش کشش برند سنتام<sup>۴</sup> (شکل ۱) مطابق با استاندارد ASTM A370 در آزمایشگاه مکانیک دانشگاه یزد انجام شده است.



شکل ۱ دستگاه آزمایش کشش

همچنین به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌ها پس از پوساب زدن، با خمیر آلومینا با اندازه ذرات ۰/۳ میکرون پولیش شده، سپس نمونه‌ها با محلول ۰/۵ درصد HF به مدت ۳۰ ثانیه اچ و در نهایت در الکل اتانول ۹۶٪ شسته شده‌اند. برای سهولت در ارائه نتایج نمونه‌ها با حروف لاتین به صورت زیر نام‌گذاری شده‌اند:

سرعت سرد شدن	حالت مذاب در لحظه افزودن آمیزان	A یا P	درصد
--------------	---------------------------------	--------	------

سلول اول از سمت چپ می‌تواند یکی از ۴ حالت a، b، c، و یا n را اتخاذ کند که هر کدام از آن‌ها نشان‌دهنده درصد نانوذره

<sup>3</sup> Brinell hardness test

<sup>4</sup> Centam brand tensile testing machine

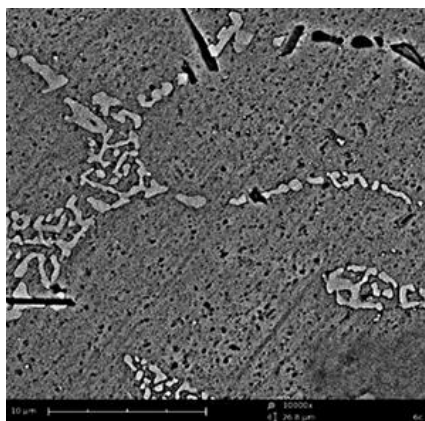
اضافه شده و درصد منیزیم موجود در آلیاژ بوده و مطابق با جدول ۲ است. حرف A در سلول دوم برای آلیاژ شامل نانو ذره آلومینا که به آلیاژ پایه اضافه شده است استفاده می شود و حرف P برای آلیاژ بدون نانوذره مورد استفاده قرار می گیرد. سلول سوم می تواند یکی از دو حالت S و یا L را داشته و همچنین سلول چهارم می تواند یکی از دو حالت H و یا L را اتخاذ کند که در جدول ۲ مشخصه آن بیان شده است.

جدول ۲ معرفی حروف استفاده شده در نام گذاری نمونه ها

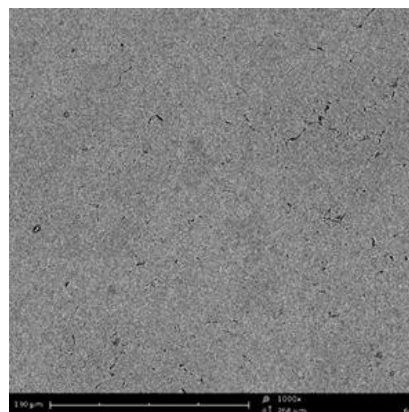
۰/۵ درصد وزنی نانوذره و ۲/۴۹۹۹ درصد وزنی منیزیم	a
۱ درصد وزنی نانوذره و ۴/۵۲۰۸ درصد وزنی منیزیم	b
۱/۵ درصد وزنی نانوذره و ۶/۵۶۰۸ درصد وزنی منیزیم	c
صفر درصد وزنی نانوذره و صفر درصد وزنی منیزیم	n
آلیاژ بدون نانوذره	P
نانوذره آلومینا	A
حالت نیمه جامد برای آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان	S
حالت مذاب برای آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان	L
سرعت سرد شدن بالا برای مذاب	H
سرعت سرد شدن پایین برای مذاب	L

## ۵- نتایج حاصل از آزمایش ها

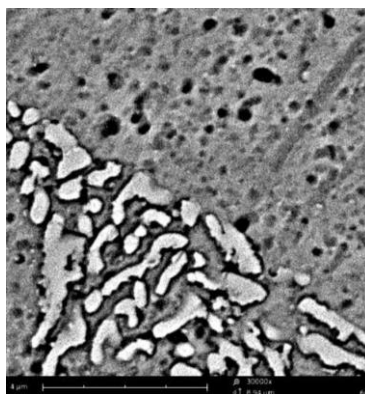
شکل ۲ تصاویر SEM گرفته شده از آلیاژ خالص آلومینیوم "A357" می باشد که در بزرگنمایی های ۱۰۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برابر گرفته شده اند. تصاویر از نمونه ای است که تحت شرایط سرعت سرد شدن پایین ریخته گری، ارائه شده است. تصاویر شکل ۲ نشان دهنده فاز یوتکتیک<sup>۵</sup> لایه ای با لایه های سیلیسیم درشت (لکه های سفید رنگ در شکل ۲-پ) است که می تواند یکی از دلایل ضعیف تر بودن استحکام کششی آلیاژ خالص در مقایسه با نانوکامپوزیت ها باشد.



(ب)



(الف)

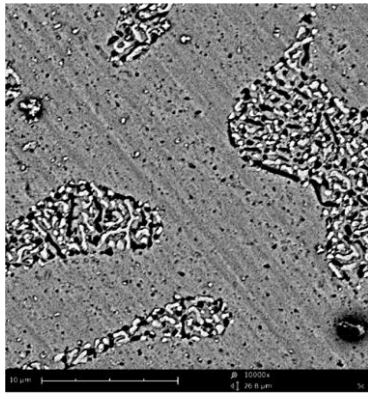


<sup>5</sup> eutectic phase

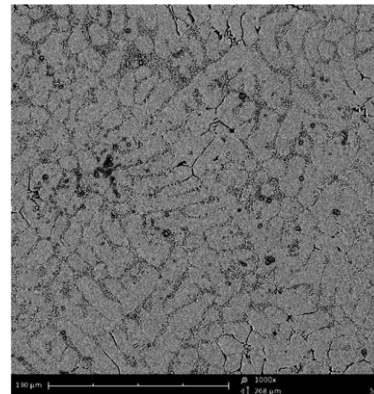
(پ)

شکل ۲ تصویر SEM آلیاژ خالص A357 با بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰۰، (ب) ۱۰۰۰۰، (پ) ۳۰۰۰۰ برابر

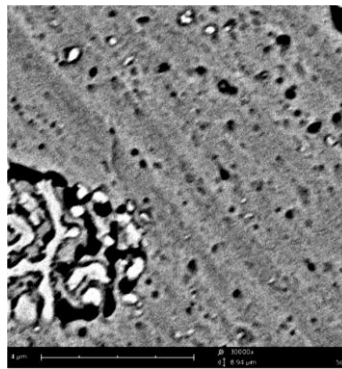
شکل ۳ شامل تصاویر SEM از آلیاژ A357 تقویت شده با ۱ درصد وزنی آلومینا است که از طریق افزودن آمیزان به مذاب در حالت نیمه‌جامد و با سرعت سرد شدن پایین ریخته‌گری شده است. در تصاویر، ریزتر شدن سیلیسیم موجود در فاز یوتکتیک و همچنین حضور نانوذرات در دندریت‌ها و فاز یوتکتیک مشهود است.



(ب)

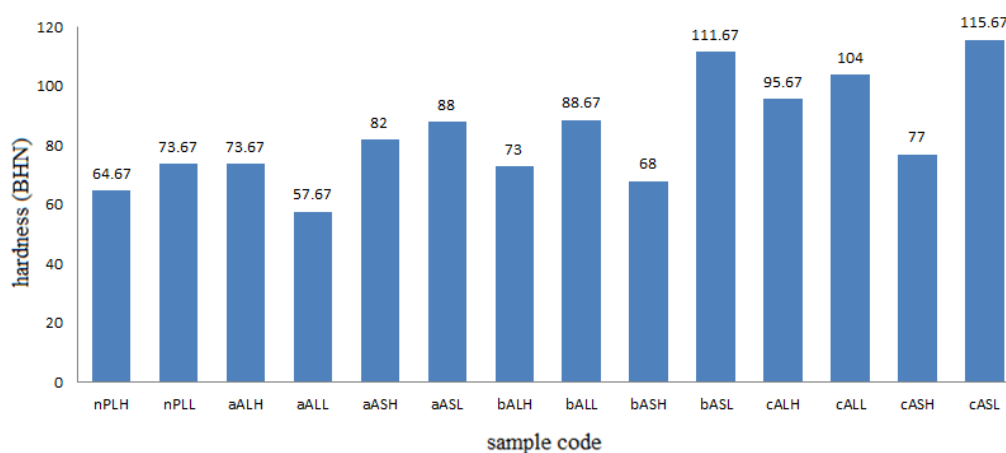


(الف)



(پ)

شکل ۳ تصویر SEM از نانوکامپوزیت ۱ درصد آلومینا بزرگنمایی‌های (الف) ۱۰۰۰، (ب) ۱۰۰۰۰، (پ) ۳۰۰۰۰ برابر

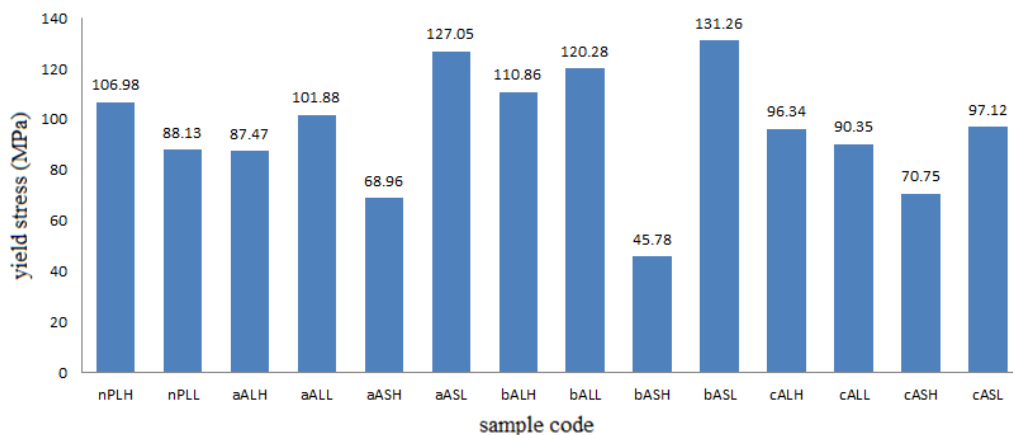


شکل ۴ نمودار سختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا

نمودار سختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بهترین سختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین عدد سختی متعلق به نمونه

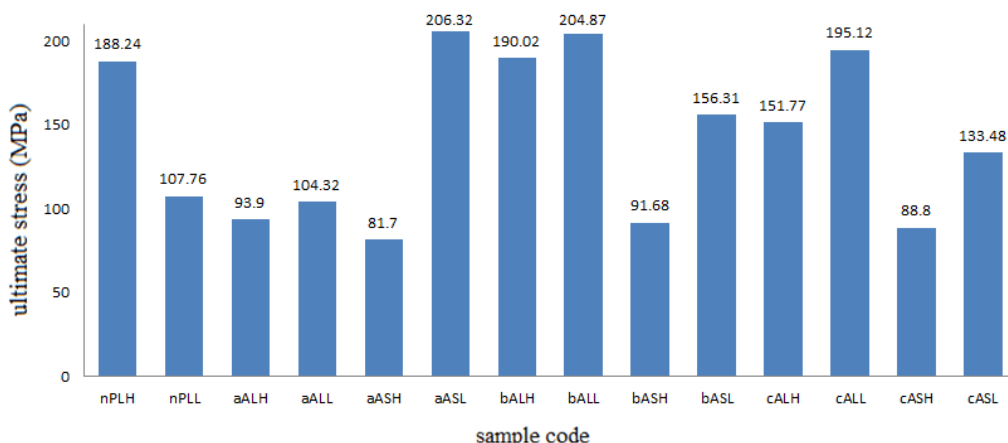
دارای ۱/۵ درصد وزنی آلومینا است.

شکل ۵ نمودار تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا را نشان می‌دهد. برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین استحکام تسلیم متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی آلومینا است.



شکل ۵ نمودار تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا

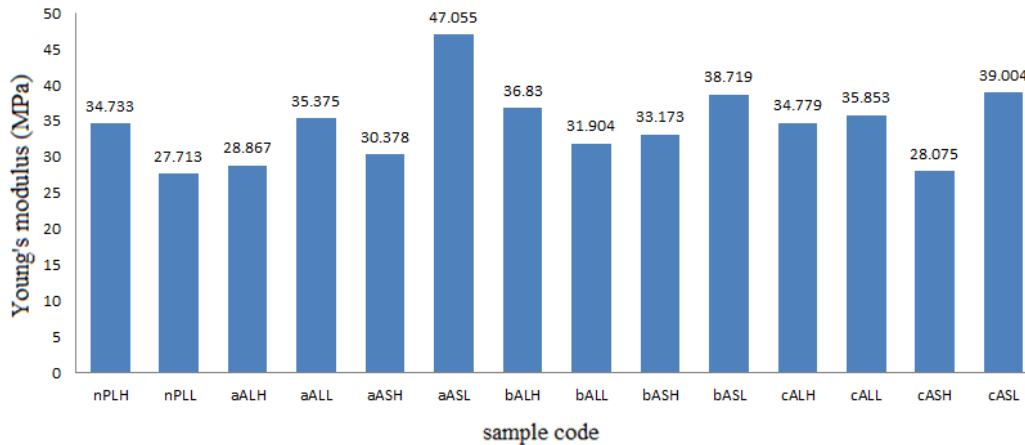
نمودار تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود برای حالت ۰/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین و برای ۱ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام کششی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین استحکام کششی نهایی متعلق به نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی آلومینا است.



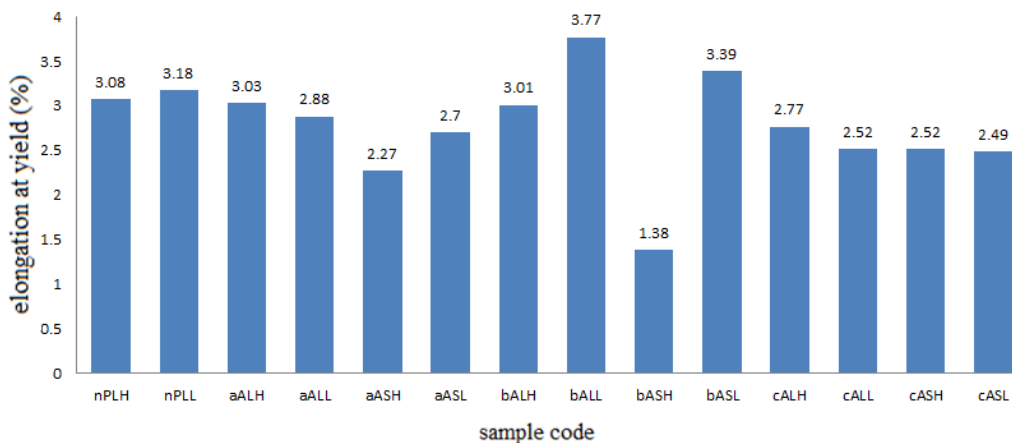
شکل ۶- نمودار تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا

شکل ۷ نمودار مدول یانگ نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا را نشان می‌دهد. برای هر سه حالت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین مدول یانگ متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین می‌باشد و همچنین بیشترین مدول یانگ متعلق به نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی آلومینا است.

نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا در شکل ۸ مشاهده می‌شود. واضح است برای حالت ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا بوده و برای ۱ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین می‌باشد و همچنین بیشترین تغییر در طول، در نقطه استحکام تسلیم متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی آلومینا است.



شکل ۷ نمودار مدول یانگ نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا

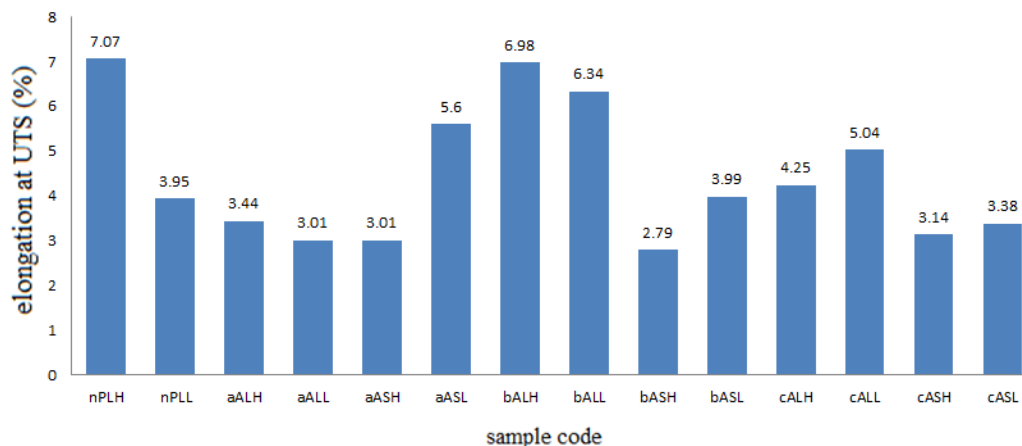


شکل ۸ نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا

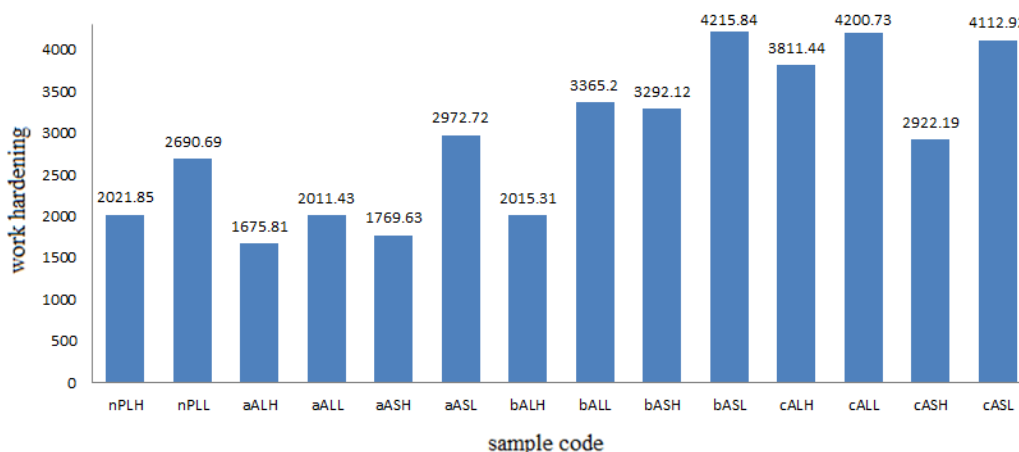
شکل ۹ نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا را نشان می‌دهد. از شکل چنین برداشت می‌شود که تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. برای حالت ۰/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است. در حالت ۱ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت مذاب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا و در حالت ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول، در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت مذاب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است. همچنین بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی آلومینا می‌باشد.

نمودار کارسختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با

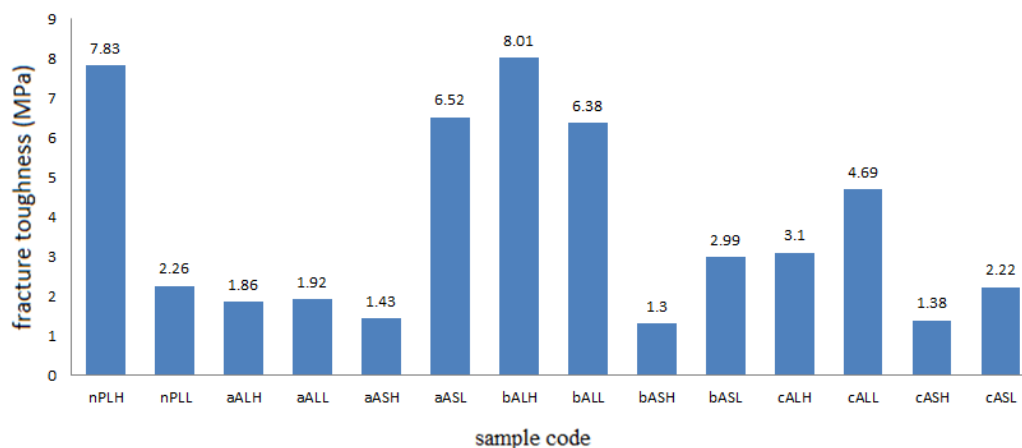
توجه به شکل مشاهده می‌شود برای حالت‌های ۵/۰ و ۱ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین کارسختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین و برای حالت ۵/۱ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین کارسختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است. همچنین بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی آلومینا می‌باشد.



شکل ۹ نمودار درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا



شکل ۱۰ نمودار کارسختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا



شکل ۱۱ نمودار چقرمگی شکست نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا

شکل ۱۱ نمودار چقرمگی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات آلومینا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود برای حالت ۰/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین چقرمگی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و در حالت‌های ۱ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول، در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت مذاب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا می‌باشد. همچنین بیشترین چقرمگی متعلق به نمونه دارای ۱ درصد وزنی آلومینا می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم در خواص مکانیکی به مراتب بهتر از آلیاژ پایه هستند. همچنین با بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های مکانیکی مشخص شد هرچه درصد وزنی نانوذره افزوده شده به آلیاژ بیشتر باشد، اثر سختی‌زایی آن بر روی آلیاژ بیشتر بوده و موجب افزایش سختی می‌گردد که می‌تواند به دلیل اثر استحکام بخشی نانوذرات آلومینا باشد.

افزودن نانوذرات آلومینا به آلیاژ مذاب در حالت نیمه-جامد به‌طور کلی موجب بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی می‌گردد. همچنین ریخته‌گری این‌گونه از نانوکامپوزیت‌ها با سرعت سرد شدن پایین خواص مکانیکی بهتری را نسبت به ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا به وجود می‌آورد که هم می‌تواند به دلیل زمان بیشتر انجماد و در نتیجه خروج مقداری از گازها و فیلم‌های اکسیدی حبس شده در نانوکامپوزیت باشد و هم به دلیل جانشینی بهتر نانوذرات. همچنین با بررسی نتایج مشخص شده که در نمونه‌های دارای ۱ درصد وزنی نانوذره آلومینا، بهترین بهبود خواص مکانیکی ایجاد شده و در ۱/۵ درصد وزنی، کاهش استحکام تسلیم و کاهش استحکام نهایی نسبت به ۱ درصد وزنی رخ می‌دهد که می‌تواند به دلیل خوشه‌ای شدن نانوذرات آلومینا و مقاومت کم خوشه‌ها در مقابل تنش‌های مکانیکی باشد. همچنین بیشترین مدول یانگ متعلق به نمونه دارای ۰/۵ درصد وزنی آلومینا است.

لازم به ذکر است عوامل بیرونی غیرقابل کنترل مانند زمان ریخته‌گری ذوب در قالب، نرخ دمش گاز آرگون و ... نیز بر روی نتایج مؤثر بوده است.

## ۷- تشکر و قدردانی

برخود لازم می‌دانیم از همکاران گرامی در پژوهشکده پوشش‌های نانو ساختار دانشگاه پیام نور یزد که با فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی کمک بزرگی به انجام این پژوهش نمودند، قدردانی نماییم.

## Authorship Contribution Statement

**Dr. Reza Rashidi Meybodi**



**Biography:** Associated professor at Department of Mechanical Engineering, Meybod University, Meybod, Iran.

**Contribution Statement:** Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

**Dr. Ali Dehghan Hamedan**



**Biography:** Yazd Desert Nanoalloy Cooperative Company, Yazd, Iran.

**Contribution Statement:** Methodology, Visualization, Validation, Formal analysis.

**Mohammad Reza Babaei zarch**



**Biography:** Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

**Contribution Statement:** Investigation, Software, Resources, Writing – original draft.

**Dr. Masoud Mahdizadeh Rokhi**



**Biography:** Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

**Contribution Statement:** Conceptualization, Analysis of results, Writing – review & editing.

## ۸- مراجع

- [1] Casati R, Vedani M. Metal matrix composites reinforced by nano-particles—a review. *Metals*. 2014; 4(1):65-83.
- [2] Bakshi SR, Lahiri D, Agarwal A. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites-a review. *International materials reviews*. 2010; (1):41-64.
- [3] Sekunowo OI, Durowaye SI, Lawal GI. An overview of nano-particles effect on mechanical properties of composites. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2015;9(1):1-7.
- [4] Rajabi M, Khodai MM, Askari N. Microwave-assisted sintering of Al-ZrO<sub>2</sub> nano-composites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2014;25:4577-84.
- [5] De Cicco M, Konishi H, Cao G, Choi HS, Turg LS, Perepezko JH, Kou S, Lakes R, Li X. Strong, ductile magnesium-zinc nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009;40:3038-45.
- [6] Cao G, Konishi H, Li X. Recent developments on ultrasonic cavitation based solidification processing of bulk magnesium nanocomposites. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2:57-65.
- [7] Mazahery A, Abdizadeh H, Baharvandi HR. Development of high-performance A356/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;518(1-2):61-4.

- [8] Habibnejad-Korayem M, Mahmudi R, Ghasemi HM, Poole WJ. Tribological behavior of pure Mg and AZ31 magnesium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles. *Wear*. 2010;268(3-4):405-12.
- [9] Habibnejad-Korayem M, Mahmudi R, Poole WJ. Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;519(1-2):198-203.
- [10] Borgonovo C, Apelian D, Makhlof MM. Aluminum nanocomposites for elevated temperature applications. *Jom*. 2011;63:57-64.
- [11] Lee-Desautels R, Theory of van der Waals Forces as Applied to Particulate Materials. *Mater. Eng.* 2005;27. 1-8.
- [12] Haritsa H, Akira MW, Zulfia Syahrial A. The Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles on Mechanical Properties and Microstructure of Aluminum A356 Composites Produced by Stir Casting Method. In *Materials Science Forum 2020* (Vol. 1000, pp. 185-192). Trans Tech Publications Ltd.
- [13] Hadad M, Babazade A, Safarabadi M. Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplates and carbon nanotubes on the improvement of mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;109:2535-47.
- [14] Prakash B, Manimaran M. Investigations on mechanical properties of Al6061-SiC nanocomposites fabricated via stir casting process. *Materials Today: Proceedings*. 2021;39:22-5.
- [15] Rashidi Meybodi R, Babaei Zarch M R, Dehghan Hamadan A, Mahdizadeh Rokhi M. Investigation of mechanical properties of reinforced aluminum-based nanocomposites with clay nanoparticles. *Journal of mechanical engineering of Tabriz University*. 2023;53(1)-71-79 (in Persian).
- [16] Rashidi Meybodi R, Dehghan Hamadan A, Babaei Zarch M R, Mahdizadeh Rokhi M. Study of the effect of magnesium oxide nanoparticles on the microstructure and mechanical properties of aluminum-based nanocomposites produced by modified stir casting method. *Aerospace knowledge and technology journal*. 2024;13(1) (in Persian).
- [17] Zhang Z, Chen DL. Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength. *Scripta materialia*. 2006;54(7):1321-6.
- [18] Pérez JS, Porcel ER, López JC, Sevilla JF, Chisti Y. Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactors. *Chemical Engineering Journal*. 2006;124(1-3):1-5.