



## بررسی اثر نانوصفحات گرافن و نانوتیوب کربن بر بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی

ابوالفضل بابازاده<sup>1</sup>، محمد جعفر حداد<sup>2\*</sup>، مجید صفرآبادی<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14155-6619، mjhadad@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

کامپوزیت‌ها، از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل دارا بودن خواص مهمی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و دامنه گسترده تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. از راه‌های بهبود و دستیابی به خواص برتر، اصلاح و بهینه‌سازی فرآیند تولید و توجه به استفاده از نانوذرات، به عنوان مقاوم‌ساز در این مواد، است. در همین راستا، روش ریخته‌گری گردابی به عنوان یکی از روش‌های توزیع ذرات مقاوم‌ساز در مذاب، در نظر گرفته شده و با توجه به خواص نانوذرات پایه کربنی، از سه درصد وزنی 0.01، 0.05 و 0.1 از نانوصفحات گرافن و نانوتیوب کربن به عنوان ذرات مقاوم‌ساز در آلیاژ اولیه A356 استفاده شد. با چندین مرتبه سعی و خطا، مناسب‌ترین شرایط برای اضافه کردن مقاوم‌سازها به مذاب حاصل شد. این شرایط شامل سرعت چرخش همزن گرافیتی، 500 RPM به مدت یک دقیقه به صورت متوالی و در دمای 740 درجه سانتیگراد حاصل شد. آنالیز عنصری، فازی و بررسی‌های ریزساختاری، توزیع و ایجاد نانوذرات مقاوم‌ساز را در زمینه کامپوزیت تایید کرد. آزمون کشش، بهبود استحکام تسلیم، نهایی و شکست را نشان داد، به گونه‌ای که حداکثر افزایش استحکام و ازدیاد طول، با استفاده از 0.1 درصد وزنی گرافن، 28% و 2.6% بوده است. همچنین با استفاده از 0.1 درصد وزنی نانوتیوب کربن، سختی نانوکامپوزیت تا 88.4 ویکرز افزایش یافته که بهبود 33% را نسبت آلیاژ بدون مقاوم‌ساز نشان می‌دهد. افزایش همزمان استحکام و کرنش از مهم‌ترین نتایج این پژوهش است.

دریافت: 1398/12/29

پذیرش: 1399/11/10

### کلیدواژه‌ها:

گرافن

کامپوزیت

ریخته‌گری گردابی

همزن

نانوتیوب کربن

## Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites

Abolfazl Babazade, Mohammadjafar Hadad\*, Majid Safarabadi

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 14155-6619, Tehran, Iran, mjhadad@ut.ac.ir

### Keywords

Graphene,  
Composite,  
stir casting,  
nanotube carbon,

### Abstract

One of the methods to improve and achieve superior properties, is to modify and optimize the Manufacturing Process and to consider the use of nanoparticles as reinforcements in these materials. In this regard, stir casting method is considered as one of the methods of distribution of refractory particles in the melt and three percent by weight of 0.01, 0.05 and 0.1% of graphene nameplates and carbon nanotubes as reinforcements particles added to The primary alloy A356, due to the properties of carbon based nanoparticles. The optimum conditions, including the rotational speed of the graphite mixer, 500 RPM, were obtained for one-minute mixing in a row, at 740°C. The results of elemental, phasic and microstructural analysis, confirmed, the distribution correctly of reinforcements nanoparticles in the composite matrix. The tensile test showed, an increase in yield, ultimate and fracture strength, and also strain, so that the maximum increase in strength and strain using 0.1 wt.% graphene, was 28% and 2.6%, respectively. Also, by using 0.1 wt.% carbon nanotube, the nanocomposite hardness increased to 88.4 Vickers, indicating a 33% improvement in the ratio of non-reinforced alloy.

### 1- مقدمه

منحصراً آلیاژی دارند [1]. به طور کلی، فاز گسسته و توزیع شده، مقاوم‌ساز و فاز پیوسته و غالب، زمینه یا ماتریکس نامیده می‌شود. مطابق با ماهیت شیمیایی فاز زمینه، مواد کامپوزیت به سه دسته زمینه فلزی<sup>1</sup>، زمینه

کامپوزیت‌ها موادی هستند متشکل از دو یا چند ماده در فازهای فیزیکی و شیمیایی مختلف، که برای دستیابی به خواص بهتر، در کنار هم قرار گرفته‌اند. به طور ویژه، کامپوزیت‌ها خواص بسیار متفاوتی نسبت به مواد

<sup>1</sup> Metal Matrix Composite

### Please cite this article using:

Babazade, A., Hadad, M.J., Safarabadi, M., "Investigation of the Effect of Graphene Nano Plates and Carbon Nanotubes on the Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Matrix Nanocomposites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1197-1206, 2021.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

شیمیایی و فیزیکی و نیز عدم وجود یا ناچیز بودن تخلخل و فیلم های اکسیدی سبب حصول خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب در محصول نهایی می شود [11].

یکی از چالش هایی که برای استفاده از نانوذرات وجود دارد، توزیع یکسان آن ها در زمینه می باشد [11]. جریان گردابی ایجاد شده به وسیله چرخش همزن، ضربات انفجار گونه به خوشه ها و کلوخه های نانوذرات وارد می کنند و از این طریق خوشه های نانوذرات را می شکنند. ضربه شدید به همراه درجه حرارت های بسیار بالای گذرا سبب افزایش ترشوندگی ذرات توسط مذاب می شود. بررسی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت ها نشان داده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانو کامپوزیت ها نسبت به آلیاژ پایه به میزان چشمگیری بیشتر است [12]. بررسی ریزساختار نانو کامپوزیت های فوق نشان داده است که اندازه دانه و بازوهای دندردیتی فاز زمینه نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ مربوطه کوچکتر است. یکی از اثرات مهم حضور نانوذرات، حذف ترکیبات بین فلزی مضر گزارش شده است [13].

مطالب عنوان شده، از مهمترین عوامل برای برابر یا بهتر بودن انعطاف پذیری<sup>7</sup> نانو کامپوزیت نسبت به آلیاژ پایه محسوب می شوند. توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه نانو کامپوزیت نسبتاً مطلوب است و همواره تعدادی خوشه و کلوخه نانوذرات در نواحی مجاور مرز دانه ها و یا در امتداد مرز دانه ها مشاهده شده است. علاوه بر این، گزارش شده است که نانوذرات مجزا بیشتر در درون دانه ها یا بازوهای دندردیتی فاز زمینه پراکنده شده اند [12].

گرافن با تعداد لایه های کم توده های صفحه ای شکل از 2 تا 10 عدد لایه گرافتی می باشد. این نوع گرافن در ابتدا به عنوان محصول جانبی و یا پیش محصول تولید گرافن تک لایه شناخته می شد، اما بعدها به عنوان یک ماده تجاری مورد توجه قرار گرفت. گرافن بسیار نازک دارای ضخامت بیش از 10 ورقه (3 - 5) و البته کمتر از 100 nm می باشد. به طور کلی گرافن به عنوان ساختاری دارای سه لایه و یا کمتر تعریف می شود [14]. اخیراً خواص الاستیکی و استحکام شکست اولیه گرافن تک لایه با مخروط فرورونده نانو توسط AFM اندازه گیری شده است. گزارش شده است که گرافن بدون عیب دارای مدول یانگ 1 TPa و استحکام کششی 130 GPa می باشد. یک ماده ورق های شکل تهیه شده از لایه های اکسید گرافن دارای مدول الاستیک متوسط و استحکام کششی بالای به ترتیب حدود 23 GPa و 100 MPa می باشد. خواص مکانیکی این کاغذ اکسید گرافنی با معرفی پیوندهای عرضی شیمیایی بین صفحات بهبود یافت [15].

نانولوله های کربنی، هم از نظر مقاومت کششی و هم از نظر ضریب کشسانی، یکی از محکم ترین موادی هستند که تاکنون شناخته شده اند. این استحکام برگرفته از پیوندهای کووالانسی sp<sup>2</sup> بین اتم های کربن است. مدول یانگ نانولوله های کربنی در راستای محورشان بسیار زیاد است. نانولوله ها به دلیل طول بسیار زیادشان از قابلیت انعطاف پذیری بالایی برخوردارند. در نتیجه، این ترکیبات برای کاربرد در مواد مرکب که به خواص ناهمگون نیاز دارند، بسیار مناسبند [16]. مقاومت کششی CNT برابر 63 GPa اندازه گیری شد. برای مقایسه، به مقاومت کششی فولاد کربنی مرغوب برابر 1.2 GPa است. همچنین، CNT ضریب کشسانی بسیار بالایی حدود 1 TPa دارد. با در نظر گرفتن این که نانولوله های کربنی چگالی وزنی پایینی 1.3 تا 1.4 g/cm<sup>3</sup> دارند، استحکام ویژه آنها در میان تمام مواد شناخته شده، بهترین است. لوله

پلیمری<sup>1</sup> و زمینه سرامیکی<sup>2</sup> دسته بندی می شوند. به دلیل تبعیت تغییرات و بهبود خواصی مانند چگالی، انبساط حرارتی، استحکام کششی، فشاری و خزشی، با تغییرات کسر فاز مقاوم ساز، توجه محققان به پژوهش در مورد کامپوزیت های زمینه فلزی جلب شده است [2]. نیاز روز افزودن به مواد پیشرفته در صنایع مهمی مانند هوافضا و خودروسازی، سبب توسعه در پژوهش های مرتبط با کامپوزیت های زمینه فلزی شده است. کامپوزیت های زمینه فلزی آلومینیوم، به دلیل دارا بودن خواص برجسته ای مانند استحکام و سفتی زیاد، قابلیت ریخته گری بالا و مقاومت به سایش عالی، کاربردهای گسترده ای در صنایع خودرو سازی و هوافضا پیدا کرده، به طوری که با پیشرفت چشمگیر در این زمینه، بر کاربرد این کامپوزیت ها، افزوده شده است [3]. در این راستا، تلاش های زیادی برای بهبود خواص این مواد، با افزودن مقاوم سازها صورت گرفته است [4]. اغلب، در کامپوزیت های زمینه آلومینیومی، فاز زمینه غنی از آلومینیوم یا یک از آلیاژهای آن و فاز مقاوم ساز یک فاز غیر فلزی مانند CNT، B<sub>4</sub>C، SiO<sub>2</sub>، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، SiC و گرافن است [5]. این دسته از کامپوزیت ها در بخش های مختلف مهندسی تحت آزمون و تست های کاربردی و ساختاری قرار گرفته و به دلیل تنوع در خواص مکانیکی، که وابسته به میزان مقاوم ساز و درصد عنصر آلومینیوم در فاز زمینه است؛ کارایی آن ها اثبات شده است. با این حال، از جمله معایب این مواد، هزینه ی بالا در مرحله ساخت و مواد مقاوم ساز بیان شده است. اصلاح و بهبود روش تولید این مواد، در کاهش هزینه و در نتیجه توسعه کاربردشان، نقشی اساسی دارد. کامپوزیت زمینه آلومینیومی با مقاوم ساز ذره ای<sup>4</sup>، به دلیل دارا بودن خواص همسانگرد<sup>5</sup> و هزینه نسبی تولید پایین به موضوعی جالب برای پژوهشگران، تبدیل شده است. ارزیابی و بررسی های انجام شده بر روش ها و فنون تولید و ریخته گری، ثابت می کند استفاده از همزن در مرحله ریخته گری<sup>6</sup>، سبب کاهش چشمگیر هزینه های تولید این نوع کامپوزیت می شود [6-8].

کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات ناپیوسته از راه های گوناگونی نظیر متالورژی پودر، تزریق مذاب در پیش ساخته، رسوب همزمان، آلیاژ سازی مکانیکی و روش های گوناگون ریخته گری نظیر ریخته گری کوبشی، ریخته گری نیمه جامد، ریخته گری گردابی و دیگر روش ها تولید می شوند [7-11]. روش ریخته گری گردابی شامل هم زدن شدید فلز مذاب، تشکیل گرداب و وارد شدن ذرات تقویت کننده به داخل گرداب می باشد. پس از افزودن ذرات تقویت کننده به مذاب، دوغاب حاصله به مدت زمان معینی هم زده می شود، سپس با روش های متداول، ریخته گری انجام می گیرد [11].

لازم بذکر است که حضور ذرات تقویت کننده سخت در زمینه آلومینیوم همواره منجر به بهبود خواص نمی شود. حضور فیلم های اکسیدی و تخلخل در کامپوزیت های تهیه شده از روش ریخته گری گردابی به دلایل مختلف از جمله کشیده شدن هوا به داخل مذاب در حین هم زدن دوغاب کامپوزیتی و ممانعت از خروج گازها از دوغاب پس از ریخته گری به دلیل گرانیوی بیشتر در مقایسه با آلیاژ زمینه، می تواند بر روی خواص مکانیکی کامپوزیت های ریخته گری شده اثر معکوس داشته باشند. در مورد کامپوزیت های زمینه فلزی ذره ای، عموماً توزیع یکنواخت و مناسب بین زمینه و ذره، وجود تطابق

<sup>1</sup> Polymer Matrix Composite

<sup>2</sup> Ceramic Matrix Composite

<sup>3</sup> Carbon Nano Tube

<sup>4</sup> Particulate-Reinforced Aluminum-Metal Matrix Composites

<sup>5</sup> Isotropic

<sup>6</sup> Stir Casting

<sup>7</sup> Elongation

ایکس، آنالیز عنصری اسپکتروسکوپی نشری<sup>1</sup>، آزمون‌های مکانیکی سختی سنجی و کشش و آنالیز ریزساختاری و متالوگرافی بوده است. با بررسی و تطابق نتایج این مراحل، بحث و نتیجه این پژوهش حاصل شده است.

## 2-1- تهیه و آماده‌سازی آلیاژ و پودر اولیه

در این پژوهش، از پودر نانو تیوب کربن و پودر گرافن، به عنوان مقاوم‌ساز با مشخصات ذکر شده در جدول 1 استفاده شده است.

جدول 1 مشخصات پودرهای مقاوم‌ساز

Table 1 Characteristics of reinforcement powders

نوع	خلوص (%)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	اندازه دانه (nm)
نانو تیوب کربن	>90	2.1	10-20
گرافن	>95	1.26	5-15

مطابق با پژوهش‌های انجام شده در این زمینه [22]، آلیاژ پایه آلومینیومی A356، به دلیل سهولت در دسترسی و همچنین قابلیت تعمیم نتایج و شهرت این آلیاژ، به کار گرفته شده است. برای شناسایی و اطمینان از ترکیب شیمیایی آلیاژ اولیه آلومینیومی A356، از آزمون عنصری اسپکتروسکوپی نشری استفاده شد. جدول 2، ترکیب شیمیایی این آلیاژ اولیه را نشان می‌دهد.

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ A356 اولیه

Table 2 Chemical Composition of primary A356 alloy

عنصر	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu
درصد وزنی	8.21	0.35	0.01	0.19	0.09	باقی مانده

همان‌طور که در بخش مقدمه بیان شد، یکی از روش‌های جدید و نوپا برای تولید نانوکامپوزیت‌ها، روش ایجاد جریان گردابی در مخلوط مذاب با استفاده از همزن است. در این راستا، ابتدا، شمش‌ها آلیاژ اولیه A356، با استفاده از اهر نواری به تکه‌های 100 گرمی بریده و تقسیم بندی شد. تکه‌های ایجاد شده تا مقدار 860 گرم در بوته‌ای از جنس گرافیت قرار گرفته و کل مجموعه درون کوره ی مقاومتی تنظیم شده بر دمای 740°C قرار داده شد. باید توجه شود، با وجود هزینه کمتر استفاده از بوته فولادی، از این بوته نمی‌توان برای ذوب و ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیومی استفاده کرد، چرا که باعث جذب عنصر آهن در مذاب و تغییر ترکیب شیمیایی و در نتیجه تغییر خواص نهایی قطعه خواهد شد.

به منظور اضافه کردن ذرات مقاوم‌ساز به مذاب، مطابق پژوهش‌های مشابه [22-26]، می‌بایست این ذرات همراه با قسمتی از مواد اولیه، به مخلوط مذاب اضافه شود. در واقع، با اضافه کردن این ذرات مقاوم‌ساز به صورت مجزا، به علت واکنش شدید، احتمال توزیع مناسب ذرات مقاوم‌ساز در سراسر مخلوط مذاب، کاهش یافته، بنابراین سبب افت خواص مکانیکی قطعه خواهند شد. به همین دلیل، از پودر آلومینیوم خالص استفاده شد. همچنین به منظور افزایش ترشوندگی ذرات مقاوم‌ساز و در نتیجه توزیع بهتر در مذاب، از پودر منیزیم خالص استفاده شده است.

بنابراین، در هر مرتبه، مقدار معینی از ذرات مقاوم‌ساز، با 100 گرم پودر آلومینیوم خالص و 40 گرم پودر منیزیم خالص، در هاون سرامیکی، مخلوط شده و 20 دقیقه عملیات آسیاکاری برای افزایش توزیع ذرات در مخلوط

ها تحت نیروی کششی بالا، دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند؛ یعنی تغییر شکل دائمی پیدا می‌کنند. در حالت فشار و به هم فشردگی، استحکام CNT کم‌تر است. این به دلیل ساختار درون تهی آنهاست که به پیچ خوردن یا خم شدن آنها (پدیده کماتش در نانولوله‌های جداره نازک یا پدیده چین خوردگی در نانولوله‌های جداره ضخیم) تحت تنشهای خمشی، پیچشی یا فشاری منجر می‌شود [17].

تحقیقات انجام شده بر روی کامپوزیت‌های زمینه فلزی با مقاوم‌ساز ذره ای در ابعاد میکرو [18] نشان می‌دهد هر چند مراحل تولید به دقت کنترل شود تا ذرات به صورت یکنواخت توزیع شوند باز هم کارایی کمتری برای افزایش استحکام نسبت به ذرات نانومتری (ذرات با اندازه ای در محدوده 10-200 nm) خواهند داشت. به صورت کلی، ذرات بزرگتر از 1.5 میکرومتر مستعد ورقه ورقه شدن و ذرات بین 200 تا 1500 نانومتر، تمایل به ایجاد حفره در فصل مشترک خود با زمینه دارند. ذرات کوچکتر از 200 نانومتر اتصال بسیار خوب با زمینه داشته که نتیجه آن خواص مکانیکی عالی و خواص حرارتی و الکتریکی قابل توجه است. همچنین با مقدار کمتری از ذرات نانو می‌توان به خواص یکسانی دست یافت [18]. استفاده از مقاوم‌ساز نانو منجر به تغییر نحوه شکست از درون دانه ای به بین دانه ای می‌شود. همچنین با بهبود قابل توجهی در متوسط چقرمگی شکست، مقاومت به خزش، مقاومت در برابر شوک حرارتی مقاومت در برابر ساییش و همچنین افزایش پایداری ابعادی در دمای بالا همراه است [19]. در پژوهشی مشابه، با بررسی اثر نانو صفحات گرافن بر کامپوزیت ریخته‌گری آلومینیوم 7068، تغییرات ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی را گزارش شده است [20]. در این گزارش، بهبود خواص مکانیکی به خصوص استحکام کششی نهایی UTS، در حضور 0.5 درصد گرافن، 41 درصد افزایش داشته است. هم چنین عنوان شده است که مکانیزم اصلی در افزایش استحکام این نانو کامپوزیت، قفل کردن و تغییر مسیر ترک می‌باشد. در پژوهشی دیگر اثر افزودن 1.5 درصد وزنی نانوتیوب کربن به آلیاژ آلومینیومی 2024 بررسی شده است. مطابق نتایج ارائه شده، استحکام فشاری، استحکام تسلیم و استحکام نهایی آلیاژ، به ترتیب به میزان حدودی 28٪، 29٪ و 32٪ افزایش یافته است. بر طبق گزارش این تحقیق، پدیده بیرون‌کشی الیاف CNT در زمینه و پل‌زدن نانوتیوب‌ها در بین ترک‌های ایجاد شده، در حین تغییر شکل پلاستیک باعث افزایش استحکام مکانیکی و در نتیجه شکست نرم شده است [21].

هدف از این پژوهش، بررسی و تعیین مناسب‌ترین درصد وزنی دو نوع مطرح مقاوم‌سازهای پایه کربنی؛ نانوتیوب کربن و نانوصفحات گرافن؛ در نانوکامپوزیت‌های آلومینیومی و تعیین چگونگی تغییر خواص مکانیکی بوده است. هزینه تهیه مواد مقاوم‌ساز در این پژوهش از جمله عوامل کنترل‌کننده است، بنابراین در انتخاب بازه درصد وزنی مواد افزودنی، به این نکته توجه شد. اصلاح و بهینه‌سازی مراحل فرآیند ریخته‌گری از دیگر اهداف این پژوهش بوده است. ارائه مجموعه ای از بهبود خواص مکانیکی، کاهش هزینه های فرآیند ریخته‌گری به علت قالب‌ریزی مستقیم، طراحی سیستم چرخشی با توجه به حجم دمای مذاب، طراحی شکل پره همزن با توجه به ویسکوزیته مذاب و چگونگی افزودن ذرات مقاوم‌ساز به مذاب از نتایج و نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

## 2- روش تحقیق

مراحل عملی این پژوهش شامل تهیه آلیاژ اولیه آلومینیومی و پودر اولیه، عملیات ریخته‌گری و انجام آزمون‌های شناسایی نظیر آنالیز فازی پراش پرتو

<sup>1</sup> Optical Emission Spectrometry

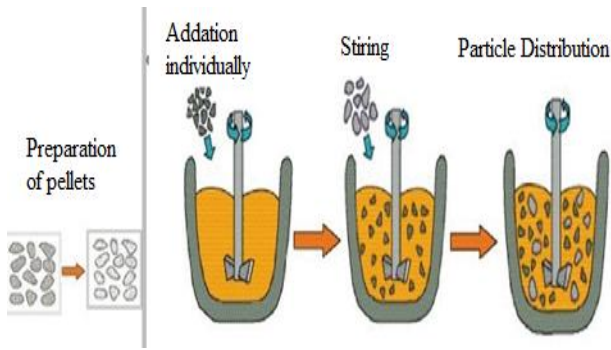


Fig. 1 Scheme of steps for adding pellets and mixer rotation

شکل 1 طرحواره مراحل افزودن گندله و چرخش همزن

در این پژوهش با توجه به سرعت چرخش 500 دور بر دقیقه و ویسکوزیته مذاب، از همزنی به شکل 2-الف، استفاده شد. همانند بوتله، برای این آلیاژ، جنس همزن نیز باید از گرافیت باشد. نحوه ی اتصال همزن به سیستم تولید نیرو، قرارگیری در بوتله و استفاده از ورق‌های فولادی جهت کاهش تماس سطح مذاب با اتمسفر در شکل 2-ب، مشاهده می‌شود. به محض پایان چرخش همزن، بوتله محتوی مذاب از کوره خارج و با رعایت سرعت بحرانی آلیاژ آلومینیوم، همراه با انجام عملیات سرباره‌گیری جهت جلوگیری از ورود اکسید به قالب، ذوب‌ریزی درون قالب استوانه‌ای؛ پیش‌گرم شده تا دمای  $200^{\circ}\text{C}$ ؛ انجام شد. در شکل 2-الف، این قالب مشاهده می‌شود.



Fig. 2 A: Graphite mixer and cylindrical mold. B: Mixer and power generation setup.

شکل 2 الف: همزن گرافیتی و بوتله استوانه‌ای. ب: نحوه قرارگیری همزن بر سیستم

ضخامت این قالب بر سرعت سرمایش و در نتیجه خواص مکانیکی قطعه، به شدت اثرگذار است. بنابراین مطابق با پژوهش‌های انجام شده [23-24]، از قالبی یک سر باز، از جنس فولاد، با ضخامت 12mm، ارتفاع 255mm و قطر خارجی 125mm، استفاده شد. لازم به ذکر است، جهت سهولت در خروج محصول از قالب، پیش از ذوب ریزی، سطح داخلی قالب با پودر گرافیت آغشته شد. در نهایت قالب محتوی مذاب، بعد از ریخته‌گری در هوای آزاد سرد شد. این مراحل برای هر شش نمونه، تکرار شد. جدول 4، طریقه نام‌گذاری این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

پودری، انجام شد. مشخصات اجزای مخلوط پودری تولید شده، در جدول 3 مشاهده می‌شود.

جدول 3 درصد وزنی پودرهای مقاوم‌ساز.

Table 3 Weight Percentage of reinforcement powders

درصد وزنی (%)		وزن (گرم)		نوع پودر	
---	---	100	40	آلومینیوم	
---	---	40	0.1	منیزیم	
0.1	0.05	0.01	1	0.5	0.1
نانو تیوب کربن					
0.1	0.05	0.01	1	0.5	0.1
گرافن					

## 2-2- عملیات ریخته‌گری گردابی

همان‌طور که اشاره شد، آلیاژ آلومینیومی A356، پس از برش تا مقدار 860 گرم درون یک بوتله گرافیتی قرار داده شده، و به درون کوره مقاومتی با دمای  $740^{\circ}\text{C}$  انتقال داده شد. باید توجه شود، به منظور جلوگیری از وارد شدن شوک حرارتی به بوتله گرافیتی، می‌بایست بوتله به همراه محتوی، در دمای پایین به درون کوره منتقل شود. به عبارت دیگر، مواد شارژی جهت تهیه ذوب، باید همراه با کوره تحت افزایش دما قرار گیرد.

مخلوط پودری حاصل شده از مرحله آماده‌سازی، به چهارده قسمت برابر تقسیم شده و هر قسمت درون فویل آلومینیومی پیچیده شده و به شکل گندله تبدیل شد. دلیل استفاده از فویل آلومینیومی، جلوگیری از پاشش پودر هنگام ورود به مخلوط مذاب و جلوگیری از اتلاف آن بوده است. پس از آماده‌شدن مذاب آلیاژ اولیه، در دمای  $740^{\circ}\text{C}$ ، یک گندله درون مذاب قرار گرفته و عملیات همزدن با سرعت و به مدت زمان معین انجام شد. عملیات همزدن برای سیزده گندله دیگر نیز انجام شد. مراحل بیان شده برای اضافه کردن گندله‌ها، صرفاً برای یک درصد وزنی معین از مقاوم‌ساز بوده است. به عبارت دیگر، تهیه و اضافه کردن گندله‌ها به مذاب، برای دو مقاوم‌ساز گرافنی و نانوتیوب کربنی و به میزان 0.01، 0.05 و 0.1 درصد وزنی؛ یا به عبارتی مجموعاً شش مرحله؛ انجام شد. به دلیل تمایل شدید اکسیداسیون مذاب آلومینیوم، در حین چرخش همزن در مذاب، از دمش گاز آرگون با خلوص 99.999 درصد با فشار 3 میلی بار و مجهز به رطوبت‌گیر، اطراف و بر سطح مذاب استفاده شد.

با توجه به گزارش‌ها و نتایج پژوهش‌های انجام شده مشابه [22-23]، سرعت چرخش همزن 500 دور بر دقیقه و زمان چرخش این همزن بین اضافه کردن دو گندله متوالی، یک دقیقه تنظیم شد. انتخاب سرعت چرخش بیش از این مقدار، سبب ایجاد جریان متلاطم درون مذاب و پاشش به بیرون؛ و سرعتی کمتر از این مقدار سبب عدم توزیع مناسب ذرات مقاوم‌ساز گزارش شده است. هم‌چنین انتخاب زمان بیش از یک دقیقه سبب گسترش اکسیداسیون درون مذاب؛ به علت ماهیت اکسید شونده‌گی شدید آلیاژهای آلومینیوم خواهد شد. زمان کمتر نیز، باعث کاهش تاثیرگذاری جریان گردابی بر توزیع ذرات شده است [22]. طرحواره کلی مراحل افزودن ذرات مقاوم‌ساز به مذاب و چرخش همزن، در شکل 1، مشاهده می‌شود.

یکی از مهم‌ترین عوامل در ایجاد جریان گردابی و توزیع مناسب ذرات درون مذاب، شکل پره همزن است. هم‌چنین توانایی کنترل چرخش مذاب و جلوگیری از پاشش مذاب به بیرون نیز از عوامل موثر در انتخاب همزن است

جدول 4 نام گذاری نمونه‌ها

Table 4 Naming samples

نوع	درصد وزنی مقاوم‌ساز		
	0.01	0.05	0.1
CN	CNT-0.01	CNT-0.05	CNT-0.1
GR	GRF-0.01	GRF-0.05	GRF-0.1

نانوکامپوزیت حاصل از ریخته‌گری گردابی، در شکل 3-الف، مشاهده می‌شود. برای انجام آزمون‌های مختلف، نمونه‌های حاصل از ریخته‌گری با استفاده از اره نواری به قطعات کوچک‌تر تبدیل شدند. برای بررسی ترکیب شیمیایی نانوکامپوزیت‌های تولید شده و اطمینان از صحت روش تولیدی، از آزمون اسپکتروسکوپی نشری (کوانتومتری) استفاده شد. مدل این دستگاه Hitachi High-Tech FOUNDRY-MASTER Smart بوده است. برای آماده‌سازی این آزمون، با ایجاد برش عرضی از مقطع نمونه‌ها و سمباده زنی تا سمباده مش 1000، سطح نمونه کاملاً مهیا انجام آزمون شد. شکل 3-ب، نمونه آماده شده برای انجام این آزمون را نشان می‌دهد. برای بررسی فازهای تشکیل شده در نانوکامپوزیت، از روش پراش اشعه ایکس و با استفاده از دستگاه مدل Bruker استفاده شد. از نمونه‌های آماده شده برای آزمون قبل، برای انجام این آزمون نیز استفاده شد. نتایج این آزمون با استفاده از نرم افزار XPert High Score تحلیل شد. به منظور بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت، از نمونه‌های مقطع زده شده استفاده شد. بدین صورت که نمونه‌ها در ابتدا تا مش 3000، سمباده زنی شده و سپس با استفاده از دستگاه پولیش مکانیکی، با استفاده از نمد مخصوص، عملیات پولیش انجام شد. در حین پولیش، پاشش محلول ذرات آلومینا 1.5 میکرومتر، انجام شد. سرعت چرخش پولیش 150 دور بر دقیقه بوده و به مدت 30 دقیقه عملیات پولیش ادامه یافت. تصاویر ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل MeijiMT7530 و تا بزرگنمایی 100 ثبت شد. آزمون‌های کشش و سختی ویکرز، برای بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های تولید شده، به کار گرفته شد. مطابق با استاندارد ASTM E8 [27] نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمون کشش تراشکاری و آماده شد. این آزمون با دستگاه یونیورسال مدل SANTAM SAF-50، با ظرفیت 5 تن و نرخ کرنش 5mm/min انجام شد. شکل 3-ج، الگو و شکل 3-د، نمونه‌های تهیه شده برای این آزمون را نشان می‌دهد. ابعاد این الگو در جدول 5، قابل مشاهده است.

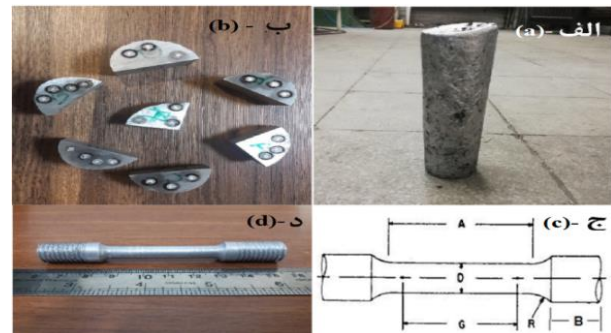


Fig. 3 A: CNT-0.01, B: Samples prepared for XRD, OES and Hardness Test C: Scheme of standard sample for Tensile Test D: Sample prepared for Tensile Test.

شکل 3 الف: نانوکامپوزیت تولید شده CNT-0.01. ب: نمونه‌های آماده‌سازی شده برای پراش اشعه ایکس، کوانتومتری، سختی سنجی، ج: نمای نمونه استاندارد کشش، د: نمونه آماده شده برای آزمون کشش.

جدول 5 ابعاد الگوی نمونه ی آزمون کشش مطابق استاندارد E8.

Table 5 Dimensions of Tensile Test Sample According to ASTM E8.

طول مشخصه	قطر	شعاع گوشه	طول قسمت کاهش یافته	طول قسمت انتهایی	قطر قسمت انتهایی	نماد
G	D	R	A	B	E	اندازه (mm)
36	9	8	45	25	14.4	

از دستگاه سختی ویکرز مدل Koopa UV-1، با وزن اعمالی 31.25 Kg برای انجام آزمون سختی بر روی نمونه‌های تهیه شده برای متالوگرافی، استفاده شد. نتایج ارائه شده میانگین 8 مرتبه انجام سختی سنجی است. لازم به ذکر است، جهت بررسی و مقایسه اثر افزودن مقاوم‌سازهای مختلف، از هر 6 نمونه برای آزمون‌های کوانتومتری، کشش و سختی استفاده شد. حال این‌که، برای آزمون‌های کیفی پراش اشعه ایکس و متالوگرافی صرفاً از دو نمونه CNT-0.1 و GRF-0.1 استفاده شده است. دلیل انتخاب این دو نمونه عدم نیاز به مقادیر کمی در این دو آزمون و استفاده از بیش‌ترین مقدار حضور مقاوم‌سازها بوده است.

### ۱- نتایج و تحلیل

#### 1-3- بررسی‌های عنصری و فازی

نتایج آزمون عنصری کوانتومتری در جدول 6 مشاهده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شده بود، آزمون کوانتومتری، ترکیب شیمیایی نانوکامپوزیت‌های تولید شده را مشخص می‌کند. با توجه به نزدیک بودن مقادیر عنصر کربن به درصد وزنی اسمی در هر شش نمونه، می‌توان صحت و درستی عملیات تولید نانوکامپوزیت را نتیجه گرفت. هم‌چنین مقادیر منیزیم در مقایسه با مقدار منیزیم در آلیاژ اولیه؛ جدول 2 به شدت افزایش یافته، که ناشی از افزودن پودر منیزیم خالص به همراه مقاوم‌ساز است. از لحاظ کمی، مقدار منیزیم در نانوکامپوزیت‌های تولید شده، نسبت به آلیاژ اولیه حدود 2.2% افزایش یافته، (افزایش 0.35% به میانگین 2.55%)، حال آن‌که، از لحاظ اسمی مقدار منیزیم می‌بایست 4٪ افزایش می‌یافت (40 گرم در 1000 گرم مذاب). این مقایسه نشان می‌دهد، در تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با مقاوم‌سازهای گرافن و نانوتیوب کربن، اتلاف منیزیم همراه با مقاوم‌ساز، 1.8% است که برای تولید با درصد‌های متغیر مقاوم‌ساز، محاسبه و گزارش این مقدار بسیار سودمند است. از توجه بیشتر به نتایج ترکیب شیمیایی، می‌توان نتیجه گرفت به دلیل نزدیکی و عدم انحراف مقدار سیلیسیوم، در نمونه‌های تولید شده؛ ایجاد جریان گردابی با مشخصه‌های سرعت چرخش و زمان همزن، در توزیع عناصر آلیاژی مفید و موثر بوده است. نتایج آزمون پراش اشعه ایکس برای دو نمونه GRF-0.1 و CNT-0.1 در شکل 4 مشاهده می‌شود. مطابق بخش الف، نانوکامپوزیت GRF-0.1 شامل فازهای  $Al(\alpha)$ ,  $Al_7Si$ ,  $Fe_2Si$ ,  $C_{16}$  (Graphene)، تشخیص داده شد.



بوده که با رنگ روشن در تصویر ریزساختاری مشخص است. در مرزدانه‌ها، فاز تیره‌رنگ و پیوسته  $Al_7Si$ ، نشان داده شده که عامل عمومی استحکام‌زا در آلیاژهای A356 است. هم‌چنین فاز سیاه رنگ در میانه تصویر مشاهده شده، که در واقع ذرات بهم‌پیوسته کربنی هستند. توجه شود، آگلومره شدن نانوذرات سبب تشکیل این فاز تیره‌رنگ شده است. در واقع در حالت ایده‌آل، این ذرات آگلومره نباید در ریزساختار تشکیل شوند. البته به دقت در تصاویر ریزساختار، ذرات بسیار ریزی تا ابعاد 0.5 میکرون نیز مشاهده می‌شود، که نشان از توزیع نسبتاً مناسب ذرات مقاوم‌ساز دارد.

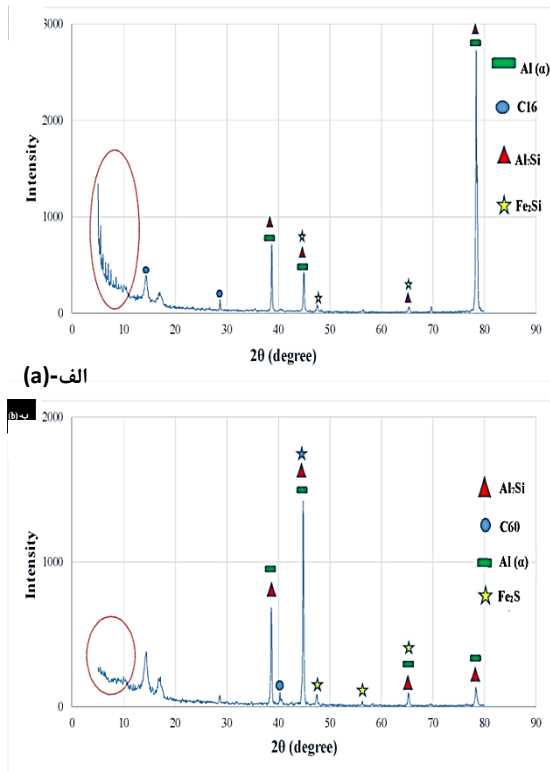


Fig. 4 XRD Patterns a: GRF-0.1 b: CNT-0.1  
شکل 4 الگوی پراش پرتوی ایکس، الف: GRF-0.1، ب: CNT-0.1

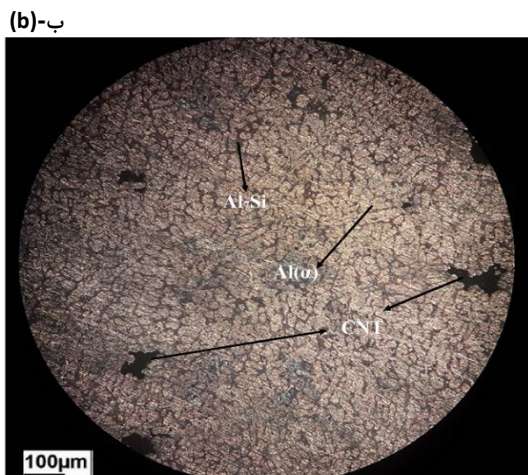


Fig. 5 Microstructure of CNT-0.1 nanocomposite prepared by optical microscope at 100X magnification.

شکل 5 ریزساختار نانوکامپوزیت CNT-0.1 تهیه شده با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 100.

جدول 6 درصد اجزای مهم نانوکامپوزیت‌های تولید شده.

Table 6 Chemical Composition of produced Nanocomposites.

	%			نمونه
	C	Si	Mg	
0.0100	7.281	2.019		CNT-0.01
0.0492	8.407	2.066		CNT-0.05
0.0988	8.215	2.749		CNT-0.1
0.0097	8.232	2.178		GRF-0.01
0.0482	9.417	2.625		GRF-0.05
0.0977	8.425	3.000		GRF-0.1

فاز زمینه آلومینیومی  $Al(\alpha)$ ، غنی از عناصر آلیاژی بوده. به عبارت دیگر عناصر آلیاژی نشان داده شده در جدول 6 کمتر از حد اشباع خودشان در این فاز به صورت محلول جامد حضور دارند. با توجه به این که پایه و اساس آلیاژ اولیه آلومینیومی بوده، حضور این فاز در نانوکامپوزیت، قابل پیش بینی بود. پیک‌ها با بیش‌ترین شدت، مرتبط به این فاز هست، که نشان از غالب بودن این فاز دارد. فازهای بین فلزی  $Al_7Si$ ،  $Fe_2Si$  نیز به صورت محدود شناسایی شده و که با توجه درصد عناصر  $Fe$  و  $Si$ ، وجود این فازها نیز قابل پیش‌بینی بوده است. در آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم، فاز  $Al_7Si$ ، فاز استحکام ده محسوب می‌شود [28] فاز کربنی گرافن که در نرم افزار Xpert High Score با نام اختصاری C16 شناخته شده، نیز به شکل محدودترین فاز موجود در این نانوکامپوزیت شناسایی شده است. نکته قابل توجه در مورد فاز C16 این است که پیک‌های مرتبط با این فاز همگی تمایل به بخش آمورف و بدون پیک منحنی دارند. این رخداد از آنجایی ناشی می‌شود که گرافن، در واقع کربن دارای ساختار دوبعدی است و طبیعی است فاز با ساختار متمایل به شکل دوبعدی، نمی‌تواند پراش اشعه ایکس داشته باشد؛ چرا که پدیده تفرق مرتبط با ساختارهای سه بعدی است. با این حال، همان‌طور که مشاهده می‌شود پیک‌هایی به فاز گرافن C16 نسبت داده شده و می‌تواند ناشی از برهم کنش پیک‌های فاز آمورف C16 و فازهای دیگر کریستالی باشد.

شکل 4-ب، الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت CNT-0.1 را نشان می‌دهد. مانند نمونه ی قبل، در این الگو نیز حضور سه فاز  $Al(\alpha)$ ،  $Al_7Si$ ،  $Fe_2Si$  با دلایل و نکات مشابه شناسایی شده است. با توجه به این که این نمونه دارای مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن بوده، حضور فاز C60 که نماد اختصاری فاز نانوتیوب کربنی است، منطقی و قابل پذیرش است. با این حال، در مقایسه با نمونه ی قبلی، فاز C60 دارای ساختار سه بعدی کریستالی بوده، لذا پیک‌های این فاز تمایلی به محدوده آمورف ندارند. هم چنین در این نانوکامپوزیت، بر خلاف نانوکامپوزیت گرافن دار GRF-0.1، از شدت محدوده آمورف کاسته شده، که به دلیل تفاوت در ماهیت کریستالی نانوتیوب کربن و آمورف گرافن است. محدوده آمورف در هر دو الگو، با منحنی بیضی شکل در سمت چپ، مشخص شده است.

### 3-2- بررسی‌های ریزساختاری

شکل 5 ریزساختار نانوکامپوزیت CNT-0.1 را در بزرگنمایی 100 نشان می‌دهد. مطابق نتایج شناسایی فازها، این نانوکامپوزیت باید دارای فازهای مشخصه خود باشد، که در شکل نشان داده شده است. فاز  $Al(\alpha)$ ، فاز زمینه

مطابق شکل 7، نقطه A، معرف نقطه ی تسلیم یا نقطه شروع حرکت نابجایی ها و شروع تغییر شکل پلاستیک است. در نقطه B، حداکثر استحکام کششی ماده بروز داده شده، و در نقطه C، ماده به شکست رسیده است. منطقه 1 نشان دهنده منطقه الاستیک، و مجموع مناطق 2 و 3 نشانگر تغییر شکل پلاستیک هستند. هم چنین تغییر شکل تا پایان منطقه 2 به شکل یکنواخت بوده، اما با وارد شدن به منطقه 3 تغییر شکل نمونه به صورت موضعی اتفاق افتاده است. شکل 8 منحنی تغییرات استحکام بر حسب کرنش را برای شش نمونه نانوکامپوزیت گرافن دار و نانوتیوب دار، نشان می دهد. با استفاده از این منحنی ها، نتایج کمی استحکام حاصل از آزمون کشش در جدول 7 و نتایج کمی کرنش در جدول 8 قابل مشاهده است.

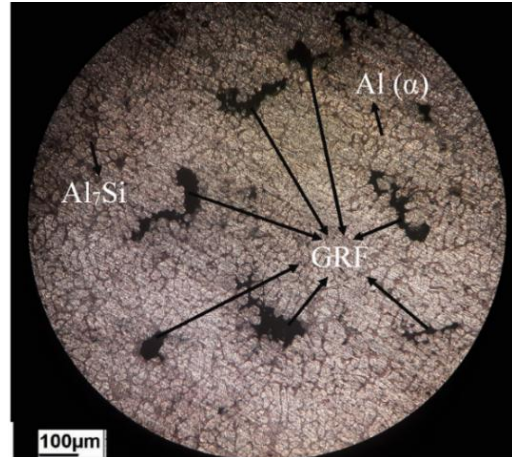


Fig.6 Microstructure of GRF-0.1 nanocomposite prepared by optical microscope at 100 magnifications.

شکل 6 ریزساختار نانوکامپوزیت GRF-0.1 تهیه شده با میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی 100.

ریزساختار نانوکامپوزیت گرافن دار GRF-0.1 در شکل 6 مشاهده می شود. مورفولوژی فاز زمینه  $Al(\alpha)$  و فاز بین فلزی  $Al_7Si$ ، مشابه مورد قبل است. با این تفاوت که آگلومره های نانوصفحات گرافن با تکرار بیشتر در میانه تصویر مشاهده می شود. دلیل حضور بیشتر فاز گرافن نسبت به نانوتیوب کربن، حتی با درصد وزنی برابر، به شکل ساختاری این دو فاز و در واقع به چگالی آن ها ارتباط دارد. فاز گرافن با چگالی کم تر از نانوتیوب کربن دارای ساختار صفحه ای و دو بعدی بوده، لذا منطقی است که در شرایط درصد وزنی برابر، گرافن کسر حجمی بیشتری از نانوکامپوزیت را اشغال کرده باشد. این مهم، در مقایسه شکل های 5 و 6 کاملاً مشخص است. نکته جالب دیگر این است که، با توجه به جدول 6 و درصد وزنی منیزیم در این دو نمونه، نانوکامپوزیت گرافنی دارای منیزیم بیشتر بوده، لذا اثر گذاری منیزیم در ترکندگی ذرات مقاوم ساز، در این نمونه، بیشتر از نمونه ی نانوتیوب کربنی بوده است. لذا انتظار می رود با افزایش ترشوندگی فاز مقاوم ساز، کسر حجمی افزایش یابد.

### 3-3- بررسی نتایج کشش

شکل 7 منحنی تغییرات استحکام مهندسی بر حسب کرنش مهندسی و مولفه های قابل شناسایی در آزمون کشش را برای نمونه CNT-0.01 نشان می دهد.

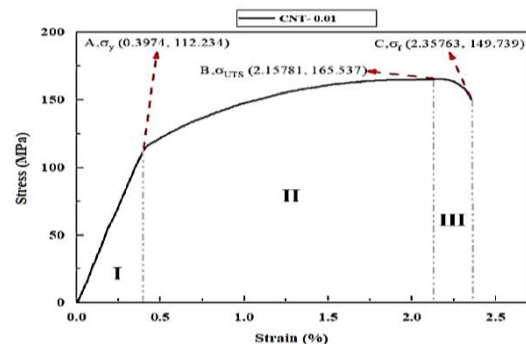


Fig. 7 Engineering Strength Change Curve Vs Engineering Strain for CNT-0.01 Sample.

شکل 7 منحنی تغییرات استحکام مهندسی بر حسب کرنش مهندسی برای نمونه CNT-0.01.

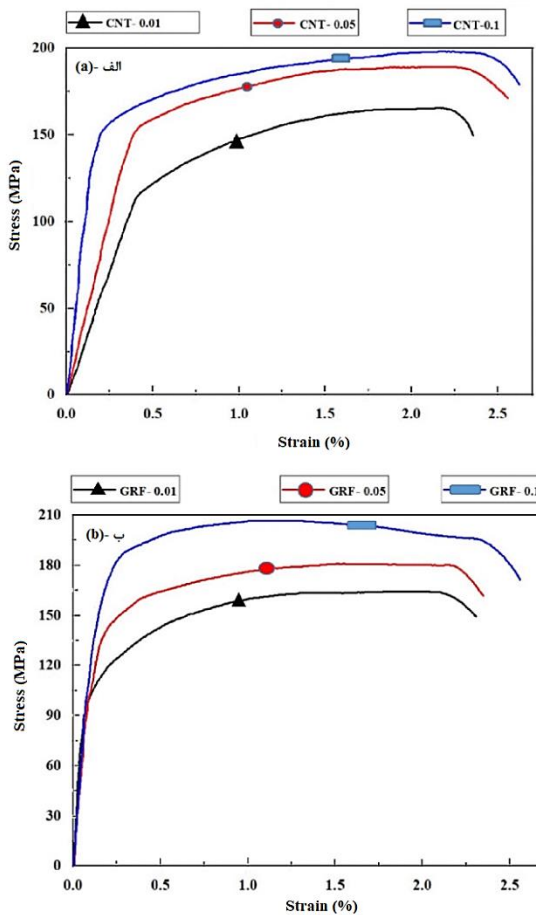


Fig 8 Engineering Strength Variations Curve Vs Engineering Strain for Fabricated nanocomposites A: CNT B: GRF

شکل 8 منحنی تغییرات استحکام مهندسی بر حسب کرنش مهندسی برای نانوکامپوزیت های تولید شده با مقاوم ساز مختلف، الف: نانوتیوب کربن، ب: گرافن

منحنی تغییرات استحکام برای نمونه های نانوتیوب دار؛ شکل 8-الف؛ نشان می دهد با افزایش مقدار مقاوم ساز در نانوکامپوزیت، استحکام در تمام نقاط افزایش یافته است. مکانیزم افزایش استحکام در حضور فاز مقاوم ساز، به دو شکل زیر است: حضور فاز مقاوم ساز و اثر گذاری بر حرکت نابجایی ها، به گونه ای که هم شروع و هم پیشروی حرکت نابجایی ها را با مشکل همراه کرده، که به معنای افزایش استحکام سیلان است. چرا که مطابق تئوری اوروان، نابجایی ها برای عبور از فاز ثانویه، مجبور به برش این فاز شده یا با ایجاد حلقه به دور فاز ثانویه، از آن عبور می کنند. در هر دو مورد، انرژی

جدول 8 نتایج کرنش نانوکامپوزیت‌های تولید شده در آزمون کشش.

Table 8 Results of Strain Tensile Test

نمونه	کرنش پلاستیک e <sub>p</sub> %	کرنش شکست e <sub>f</sub> %
CNT-0.01	1.96	2.36
CNT-0.05	2.20	2.56
CNT-0.1	2.42	2.63
GRF-0.01	2.17	2.31
GRF-0.05	2.19	2.35
GRF-0.1	2.41	2.56

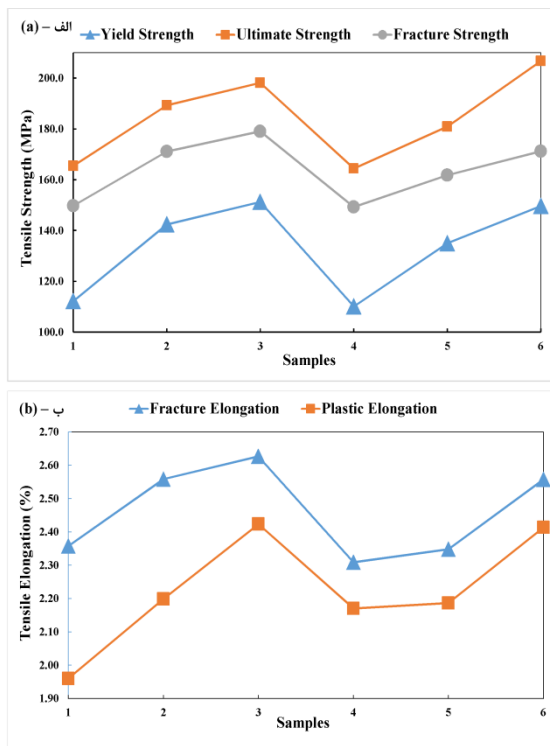


Fig. 9 Trends of Changes in Tensile Test Components a: Strength b: Strain. 1: CNT-0.01 2: CNT-0.05 3: CNT-0.1 4: GRF-0.01 5: GRF-0.05 6: GRF-0.1

شکل 9 روند تغییرات مولفه‌های آزمون کشش الف: استحکام ب: کرنش. نمونه شماره

1: CNT-0.01. 2: CNT-0.05. 3: CNT-0.1. 4: GRF-0.01. 5: GRF-0.05. 6: GRF-0.1.

با توجه به نتایج حاصل در این بخش، می‌توان نتیجه گرفت، به طور کلی افزودن مقاوم‌ساز کربنی، به آلیاژ اولیه آلومینیومی A356، سبب افزایش انعطاف پذیری خواهد شد. در بهترین حالت، با افزودن 0.1% مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن کرنش شکست تا حد 2.63% افزایش یافته. به نظر می‌رسد به دلیل حضور فاز مقاوم‌ساز و ایجاد اثر اصلاح اندازه دانه بر فاز زمینه، جوانه‌زنی و رشد ترک؛ که عامل ایجاد شکست است؛ به تعویق افتاده باشد. همچنین همان‌طور که در بخش بررسی استحکام نیز عنوان شد، حرکت نایجایی‌ها در حضور مقاوم‌ساز به تعویق افتاده که به معنی افزایش انعطاف پذیری و کرنش است.

با توجه به شکل 9-ب، در مقادیر کم، اثر مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن بیش از گرافن بوده. حال آنکه، با افزایش مقدار مقاوم‌ساز تا 0.1%، اثر گذاری

نایجایی جذب خواهد شد، به عبارت دیگر، نایجایی برای حرکت و ادامه تغییر شکل نیاز به انرژی بیرونی خواهد داشت که به معنای اعمال تنش و افزایش استحکام است [29]. مورد دوم، اثرگذاری فاز مقاوم‌ساز بر رشد دانه فاز زمینه در هنگام انجماد. به عبارت دیگر، حضور فاز ثانویه باعث جلوگیری از رشد دانه و اصلاح اندازه دانه فاز زمینه خواهد شد. مطابق رابطه هال-پچ با کاهش اندازه دانه، استحکام به خصوص استحکام تسلیم افزایش می‌یابد. این عامل اثرگذار با عنوان فاکتور محدود کننده رشد در مباحث انجمادی شناخته شده و در گزارش پژوهش‌های انجام شده در این مورد، عنصر کربن یکی از عناصر دارای این فاکتور برای آلیاژهای آلومینیومی شناخته شده است [30]. بنابراین، افزایش استحکام در حضور مقاوم‌سازهای کربنی در آلیاژهای آلومینیومی، منطقی به نظر می‌رسد.

جدول 7 نتایج استحکام نانوکامپوزیت‌های تولید شده در آزمون کشش.

Table 7 Results of strength Tensile Test

نمونه	استحکام تسلیم σ <sub>y</sub> (MPa)	استحکام نهایی σ <sub>uts</sub> (MPa)	استحکام شکست σ <sub>f</sub> (MPa)
CNT-0.01	112.2	165.5	149.7
CNT-0.05	142.4	189.4	171.2
CNT-0.1	151.3	198.2	179.0
GRF-0.01	110.2	164.5	149.3
GRF-0.05	135.0	181.0	161.8
GRF-0.1	149.7	206.8	171.3

از طرفی، از مقایسه استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های تولید شده، با استحکام آلیاژ بدون مقاوم‌ساز یا همان آلیاژ اولیه آلومینیومی، می‌توان استنباط کرد، حضور مقاوم‌ساز پایه کربنی حتی با کم‌ترین مقدار یعنی 0.01% نیز سبب افزایش قابل توجه در استحکام شده است. استحکام نهایی آلیاژ A356 در شرایط ریخته‌گری معمولی حدود 160 مگاپاسکال گزارش شده [27]؛ که از استحکام نهایی تمام نمونه‌های تولید شده در این پژوهش کمتر بوده است. در بهترین حالت، با افزودن 0.1% گرافن، استحکام نهایی 206.8 مگاپاسکال حاصل شده، که رشد 28% در استحکام نهایی نسبت به نمونه آلیاژ اولیه را نشان می‌دهد. روند رشد استحکام تسلیم، نهایی و شکست در حضور هر دو مقاوم‌ساز، در شکل 9-الف، کاملاً مشاهده می‌شود. مقایسه استحکام حاصل شده در درصد وزن ثابت، بین دو مقاوم‌ساز، نشان می‌دهد اثر گرافن در افزایش استحکام، به خصوص استحکام نهایی، بیش‌تر از نانوتیوب کربن باشد (شکل 9-الف). در واقع، همان‌طور که در بخش 2-3 و نتایج متالوگرافی عنوان شد، فاز گرافن کسر حجمی بیش‌تری در مقایسه با نانوتیوب کربن، از زمینه اشغال کرده. تصاویر ریزساختاری این مهم را نشان داد. دلیل این امر، چگالی کم‌تر گرافن نسبت به نانوتیوب کربن و تر شونده‌گی بیش‌تر آن عنوان شد. بنابراین، کسر حجمی بیش‌تر به معنای اثرگذاری بیش‌تر بر ایجاد موانع برای حرکت نایجایی‌ها، و در نهایت افزایش استحکام خواهد بود.

تغییرات طول نسبت به طول اولیه، کرنش مهندسی نامیده می‌شود. کرنش در محدوده تغییر شکل پلاستیک و کرنش تا نقطه شکست، برای نمونه‌های تولید شده، از متحنی‌های شکل 8 محاسبه شده و نتایج کمی آن در جدول 8، گزارش شده است. کرنش پلاستیک آلیاژ آلومینیومی A356، در شرایط ریخته‌گری معمولی حدود 2% گزارش شده است [31].



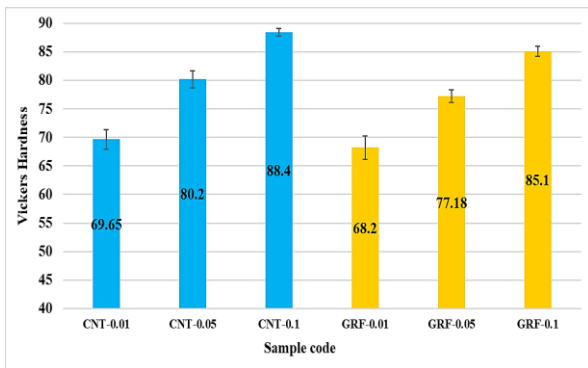


Fig.10 Results of Vickers Hardness

## شکل 10 نمودار سختی ویکرز

این پدیده را می‌توان به افزایش کسر حجمی ذرات در فاز زمینه، بر اثر افزایش درصد وزنی، ارتباط داد. در واقع، هر چه انحراف معیار سختی کم‌تر باشد، مبین این نکته است که توزیع ذرات فاز مقاوم‌ساز در زمینه بهتر بوده است. بنابراین انحراف معیار کم در این بخش، می‌تواند نشانه‌ای از خواص مکانیکی مناسب و هم‌چنین صحت عملیات ریخته‌گری گردابی باشد.

## 4- جمع‌بندی

موارد زیر به عنوان جمع بندی نتایج و دستاوردهای این پژوهش بیان می‌شود:

- با طراحی سیستم چرخشی و همزن، کنترل متغیرها و بهینه‌سازی عملیات ریخته‌گری گردابی، برای تولید نانو کامپوزیت‌های مقاوم شده با نانو صفحات گرافن و نانو تیوب کربن، با موفقیت انجام شد.
- دمای  $740^{\circ}\text{C}$  به عنوان دمای عملیات ریخته‌گری، سرعت چرخش همزن 500 RPM به مدت حدود 14 دقیقه برای هر نمونه، از جمله متغیرهای بهینه‌سازی شده بودند.
- آنالیزهای عنصری و فازی، حضور فاز مجزای کربنی را تایید کرد. هم‌چنین تصاویر ریزساختار، توزیع این فازهای مقاوم‌ساز را در مرزخانه آلیاژ زمینه، نشان داد.
- آزمون کشش نشان داد، حضور و افزایش درصد وزنی مقاوم‌ساز، سبب افزایش استحکام در هر سه نقطه تسلیم، نهایی و شکست، برای هر دو مقاوم‌ساز شده است.
- بیشترین افزایش استحکام نسبت به آلیاژ بدون مقاوم‌ساز، متعلق به مقاوم‌ساز گرافن با درصد وزنی 0.1 بوده است. در این حالت، استحکام تسلیم، نهایی و شکست نانوکامپوزیت، به ترتیب 149.7، 206.8 و 171.3 مگاپاسکال حاصل شد.
- حضور و افزایش درصد وزنی هر مقاوم‌ساز باعث افزایش انعطاف‌پذیری نانوکامپوزیت شده است. بیش‌ترین افزایش در انعطاف‌پذیری، متعلق به مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن با درصد وزنی 0.1، تا میزان 2.63% بوده است.
- در هر دو مقاوم‌ساز، استحکام و انعطاف پذیری همزمان افزایش یافته است، که در نهایت منجر به افزایش چشمگیر انرژی چقرمگی خواهد شد. این امر در طراحی و انتخاب مواد مهندسی، بسیار مهم و ایده‌آل است.
- با حضور و افزایش درصد وزنی مقاوم‌سازها، سختی به عنوان معیاری از مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک، افزایش یافته است. بیش‌ترین سختی حاصل شده متعلق به نانوکامپوزیت مقاوم‌شده با 0.1% وزنی نانوتیوب کربن بوده است. سختی در این حالت تا 88.4 ویکرز افزایش یافته است.

گرافن و نانوتیوب کربن تقریباً برابر شده است. علت این امر می‌تواند چگالی پایین‌تر و تر شونده‌گی بالاتر، گرافن باشد، چرا که افزایش اثر کسر حجمی بر افزایش کرنش را در درصد وزنی بالا، بیش‌تر نشان داده است.

نکته بسیار مهم در بررسی نتایج آزمون استحکام، افزایش همزمان استحکام و انعطاف پذیری، با افزودن فاز مقاوم‌ساز و هم‌چنین افزایش مقدار آن است. این امر می‌تواند به عنوان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش عنوان شود، چرا که افزایش همزمان این دو معیار مستقل، به معنای افزایش شدید قابلیت جذب انرژی تا شکست، یا همان چقرمگی است.

## 3-4- بررسی نتایج سختی‌سنجی

آزمون سختی بر نمونه‌های تولیدی انجام گرفته و نتایج آن به صورت میانگین عدد سختی ویکرز در جدول 9، گزارش شده است.

## جدول 9 نتایج آزمون سختی ویکرز

Table 9 Results of Vickers hardness Test.

انحراف معیار	میانگین سختی	نمونه
SD <sup>1</sup>	HV	
1.71	69.65	CNT-0.01
1.50	80.20	CNT-0.05
0.66	88.40	CNT-0.1
2.03	68.20	GRF-0.01
1.09	77.18	GRF-0.05
0.86	85.10	GRF-0.1

برای درک بهتر اثر مقاوم‌ساز، نمودار ستونی میانگین عدد سختی ویکرز، رسم شده و در شکل 10 مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش درصد وزنی، در هر دو مقاوم‌ساز، عدد سختی افزایش پیدا کرده است. در واقع، می‌توان عنوان کرد که سختی معیاری هم‌خانواده با استحکام کششی است. با این تفاوت که در حالت کشش، قطعه تحت بار ثابت تا تغییر شکل پلاستیک و شکست باقی می‌ماند [22].

حال آن‌که در سختی، صرفاً بار از طریق یک نفوذکننده به سطح قطعه وارد شده، و معمولاً قطعه را به مرحله تغییر شکل پلاستیک و شکست نمی‌رساند. با این توضیحات، می‌توان انتظار داشت روند تغییرات سختی نیز مشابه روند تغییرات استحکام باشد که تطابق نتایج آزمون کشش و سختی سنجی نیز همین امر را تصدیق می‌کند.

سختی آلیاژ اولیه آلومینیومی A356، 64 ویکرز گزارش شده است [32]. بنابراین همانند استحکام، در این بخش نیز افزودن مقاوم‌ساز، حتی به مقدار 0.01%، باعث افزایش از 64 ویکرز به 68.2 ویکرز با مقاوم‌ساز گرافنی شده است. در بهینه‌ترین حالت، با افزودن 0.1% نانوتیوب کربن، سختی تا 88.4 ویکرز افزایش یافته که افزایش حدود 33% را، نسبت به حالت بدون مقاوم‌ساز نشان می‌دهد.

به دلیل تکرارپذیری سختی، با محاسبه انحراف معیار برای هر نمونه، نکته مهم و بسیار جالبی پدیدار می‌شود. در هر مقاوم‌ساز، با افزایش درصد وزنی، انحراف معیار سختی اندازه‌گیری شده به طور محسوسی کاهش یافته است.

<sup>1</sup> Standard Deviation

- [18] Fischer, L., Raj, R., "Literature Survey Report: Nano-Dispersion Strengthening of Aluminum," Introduction to Research, University of Colorado 2004.
- [19] Borgonovo, C., Makhlof, M., "Synthesis of Aluminum-Aluminum Nitride Nanocomposites by a Gas-Liquid Reaction II. Microstructure and Mechanical Properties", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 47, No. 4, pp. 1818-1827, 2016.
- [20] Alipour, M., Farsani, R., "Investigation of the Microstructure and Mechanical Properties of Cast AA7068 Nanocomposite Reinforced with Graphene Nano Plates", In Persian, *Moadres Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 139-144, 2017.
- [21] Rikhtegar, F., Shabestari, S., Saghafian, H., "Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Al2024-CNT Nanocomposite Produced by Flake Powder Metallurgy Process", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 91-100, 2017.
- [22] Boostani, A., Tahamtan, S., Yazdani, S., "Enhanced Tensile Properties of Aluminium Matrix Composites Reinforced With Graphene Encapsulated SiC Nanoparticles", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 68, pp. 155-163, 2015.
- [23] Kwon, H., Park, D., Silvain, J., "Investigation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials", *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 546-550, 2010.
- [24] Esawi, A., Morsi, K., "Fabrication and Properties of Dispersed Carbon Nanotube-Aluminum Composites", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 508, pp. 167-173, 2009.
- [25] Tang, J., Fan, G., "Synthesis of Carbon Nanotube/Aluminum Composite Powders by Polymer Pyrolysis Chemical Vapor Deposition", *Carbon*, Vol. 55, pp. 202-208, 2013.
- [26] Choi, H., Min, B., Shin, J., "Strengthening in Nanostructured 2024 Aluminum Alloy and Its Composites Containing Carbon Nanotubes", *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 1438-1444, 2011.
- [27] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, pp. 98-105, 2000.
- [28] Alipour, M., Farsani, R., "Investigation of the Microstructure of Cast Al7068 Nanocomposite Reinforced with SiC Nano Particles", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 461-468, 2018.
- [29] Dieter, G. E., "Mechanical Metallurgy", Third ed., McGraw-Hill Education, New York, pp. 453-455, 1986.
- [30] Yolshina, L.A., Muradymov, R.V., Korsun, I.V., "Novel Aluminum-Graphene And Aluminum-Graphite Metallic Composite Materials Synthesis and properties", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 663, pp. 449-459, 2016.
- [31] Burapa, R., Janudom, S., Chucheep, T., Canyook R., Wannasin, J., "Effects of Primary Phase Morphology on Mechanical Properties of Al-Si-Mg-Fe Alloy in Semi-Solid Slurry Casting Process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, pp. 857-861, 2010.
- [32] Langlais, J., Lemieux, A., Kulunk, B., "Impact of the SEED Processing Parameters on The Microstructure and Resulting Mechanical Properties of A356 Alloy Castings", *Transactions-American Foundrymens Society*, vol. 114, pp. 06-125, 2006.
- [1] Surappa, M. K., "Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities", *Sadhana*, Vol. 28, pp. 319-334, 2003.
- [2] Mahallawi, E., Egenfeld, I.S., Kouta, K., "Synthesis and Characterization of New Cast A356/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Metal Matrix Nano-Composites", In *Proceedings of the 2nd Multifunctional Nanocomposites & Nanomaterials: International Conference & Exhibition MN2008*, Cairo, Egypt, January 11-13, 2008.
- [3] Hashim, J., "Metal Matrix Composites: Production By the Stir Casting Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1, pp. 92-23, 2009.
- [4] Mahallawi, E., Shash, A. Y., "Nanoreinforced Cast Al-Si Alloys with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> Nanoparticles", *Journal of Metals*, Vol. 5, pp. 802-821, 2015.
- [5] Mahallawi, E., Shash, Y., Mahmoud, K., "Influence of Nano-Dispersions on Strength Ductility Properties of Semi-solid Cast A356 Al Alloy", *Materials Science and Technology*, Vol. 26, pp. 1226-1231, 2010.
- [6] Schwedt, A., Mayer, J., Amer A., "Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-Dispersions on Microstructure Features and Mechanical Properties of Cast and T6 Heat-Treated Al-Si Hypoeutectic Alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, pp. 76-87, 2012.
- [7] Khademian, M., Heidari, M., Alizade, A., "Investigation the Effect of Hot Rolling Process on Properties and Microstructure of Al-B4C Composite By Vortex", In Persian, *Moadres Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 140-146, 2014.
- [8] Yazdani, A., Salahinejad, E., "Evolution of Reinforcement Distribution in Al-B4C Composite During Accumulative Roll Bonding" *Material and Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3137-3142, 2011.
- [9] Tabesh, A., Ebrahimi A., "The Investigation and Comparison of Mechanical properties and Microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Produced by Mixed Accumulative Roll Bonding", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 4, No. 4, pp. 464-470, 2018.
- [10] Khoramshad, H., Khodaei, M., "Sensitive of The Impact Behavior of Multi-layered Metal Laminate to the Position of the Material Parameters Variations", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composite*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-34, 2014.
- [11] Wenzhen, L., Shiyong, L., Qiongyuan, Z., Xue, Z., "Ultrasonic-Assisted Fabrication of SiC Nanoparticles Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Materials Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 990-993, 2010.
- [12] Hihn, J. Y., Doche, M. L., Mandroyan, A., Hallez, L., Pollet, B. G., "Respective Contribution of Cavitation and Convective Flow to Local Stirring in Sonoreactors", *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 18, pp. 881-887, 2011.
- [13] Chen, Y., Tekumalla, S., Guo, Y. B., Shabadi, R., Gupta, M., "The Dynamic Compressive Response of A High-Strength Magnesium Alloy and Its Nanocomposite", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 702, pp. 65-72, 2017.
- [14] Park, S., "Collide Suspensions of Highly Reduced Graphene Oxide In a Wide Variety of Organic Solvents", *Nano Letters*, Vol. 9, No. 4, pp. 1593-1597, 2009.
- [15] Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., "Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties and Applications", *Advanced Materials*, Vol. 22, pp. 3906-3924, 2010.
- [16] Niyogi, S., "Chemistry of Single-Walled Carbon Nanotubes", *Accounts of Chemical Research*, vol. 35, no. 12, pp. 1105-1113, 2002.
- [17] Sun, C., Liu, K., "Dynamic Torsional Buckling of a Double-Walled Carbon Nanotube Embedded in an Elastic Medium", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 27, No. 1, pp. 40-49, 2008.

## 5- مراجع