



## تأثیر نانو لوله‌های کربنی چند جداره به عنوان فاز تقویت کننده بر سختی و استحکام خمشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸

مهدی حیدری<sup>۱\*</sup>، فرزانه براتی<sup>۲</sup>

Mehdiheidari65@Yahoo.com  
Farzanbarati@Yahoo.com

### چکیده

در ساله‌های اخیر توجه زیادی به نانو مواد، بخصوص نانو مواد یک بعدی شده است. یکی از مهمترین موادی که در این زمینه توجه محققان را به خود جلب کرده، نانو لوله‌های کربنی می‌باشد، که به دلیل داشتن همزمان خواص مکانیکی، فیزیکی و الکترونیکی مطلوب، یک ماده‌ی منحصر به فرد به شمار می‌آیند. بنابراین تأثیر خواص این ماده به عنوان فاز تقویت کننده بر کامپوزیت‌های زمینه فلزی دنیای جدید و فعالی را بر روی نانو تکنولوژی گوشوده است. لذا در پژوهش حاضر با استفاده از روش SPS<sup>۳</sup> که یکی از روش‌های نوین تفجوشی پودرهای فلزی است، کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم سری ۷۰۶۸ تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی چند جداره تولید شده است. به منظور تولید کامپوزیت‌های ذکر شده ابتدا پودر آلومینیوم سری ۷۰۶۸ خالص را به همراه افزودن درصد مشخصی از اتانول به عنوان ایستگاه کنترل فرآیندی با دو دسته از نانو لوله‌های کربنی چند جداره دارای متوسط قطرهای داخلی ۱۰nm و ۶۵nm با درصدهای وزنی مختلف (۲-۰ wt%) با استفاده از آسیابکاری سیاره-ای به مدت ۲۴ ساعت با هم مخلوط کرده، سپس عملیات تفجوشی پودر مخلوط شده‌ی آلومینیوم-نانو لوله‌های کربنی چند جداره را با استفاده از دستگاه SPS انجام گردید. مشخصات نانو لوله‌های کربنی استفاده شده در ساخت کامپوزیت‌های مورد نظر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری و همچنین ریز ساختار کامپوزیت ساخته شده و چگونگی توزیع نانو لوله‌های کربنی با میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه گردید. آنالیز فازی نمونه‌های ساخته شده با استفاده از الگوی پراش اشعه ایکس صورت گرفت. نتایج حاکی از آن است که روش SPS، روش مناسبی برای ساخت کامپوزیت‌های مورد نظر است و استفاده از نانو لوله‌های کربنی به عنوان ماده تقویت کننده در زمینه آلومینیوم سری ۷۰۶۸ در مقدار بهینه (۱ درصد وزنی) و قطر ۱۰nm باعث افزایش سختی تا ۸۲/۷۴ درصد، استحکام خمشی تا ۲۷/۳۴ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نانو لوله‌های کربنی، نانو کامپوزیت، استحکام خمشی، سختی، تفجوشی با جرقه‌ی پلاسما.

۱- و \* نویسنده مسئول: کارشناس ارشد گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان ۰۹۰۱۲۲۲۲۹۰۶

۲- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان ۰۹۱۸۳۱۱۳۶۲۶



## ۱- مقدمه

در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی گستره وسیعی از فلزات و آلیاژها مانند آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژهای مس، چدن، فولاد، آلیاژهای منیزیم، سوپر آلیاژهای پایه نیکل، آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای روی و... کاربرد دارند. استحکام و سختی و سایر خواص مکانیکی آلومینیوم نسبت به فلزاتی چون آهن، نیکل و تیتانیوم ضعیف‌تر می‌باشد. لذا آلومینیوم صرفاً به صورت آلیاژی یا به عنوان کامپوزیت و یا ترکیبی از این دو استفاده می‌شود تا از خواص مکانیکی بهتری برخوردار باشد (رضوی حسابی و همکاران، ۲۰۰۶: ۱۶۸-۱۵۹، دورای و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۰۵-۱۰۰). همچنین آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ به علت مقاومت زیاد نسبت به وزنشان کاربرد گسترده‌ای در صنایع نظامی و صنایع هوا و فضا دارند (هاج و همکاران، ۱۹۸۴، جانسون و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۲۵). مقاومت این آلیاژ با افزودن عناصر آلیاژی مس و روی به علت رسوب ترکیبات بین فلزی افزایش پیدا می‌کند (فارین هولتز و همکاران، ۲۰۰۲: ۲۰۸-۱۵۵، پالومینو و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۰۸). بر همین اساس کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs) و بخصوص کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم (AMCs) طی دو دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است.

از زمان کشف نانو لوله‌های کربنی که خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی بی‌همتایی را دارا می‌باشند، تلاش‌هایی برای توسعه کامپوزیت‌های پیشرفته با افزودن این نانو لوله‌ها به فازهای فلزی صورت گرفته است تا به ویژگی‌های ایجاد شده نسبت به کامپوزیت‌های قدیمی پی برده شود. در حالی که تحقیقات بر روی کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی نسبتاً محدود بوده است، که این امر عمدتاً به دلیل وجود مشکلاتی در دستیابی به توزیع یکنواخت نانو لوله‌های کربنی در آلیاژ پایه مربوط می‌شود، آگلومره شده تقویت کننده‌ها در فاز زمینه کامپوزیت نیز باعث افت خواص مکانیکی می‌شود. آسیابکاری با انرژی بالا روشی است که توزیع ذرات بسیار همگنی را ایجاد می‌کند و اولین نیاز یک کامپوزیت برای نشان دادن کارایی بالای آن که توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده است را حل می‌کند (فاگاگونال و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۴۳-۱۳۱). و به همین دلیل در سال‌های اخیر روش‌هایی مانند آلیاژسازی مکانیکی برای تولید کامپوزیت‌های پایه فلزی گسترش یافته است. اندازه ذرات تقویت کننده و اندازه دانه فاز زمینه ماده مرکب از جمله عوامل موثر در خواص مکانیکی این نوع از مواد می‌باشند (وایو و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۱۳-۲۰۶). خواصی که در کاربرد انواع کامپوزیت‌ها بسیار موثر است عبارتند از چگالی، سختی و استحکام آنهاست. در قطعات تولید شده به روش متالوژی پودر به علت خلل و فرج موجود، چگالی و سختی بالا به راحتی قابل حصول نمی‌باشد، به همین دلیل استفاده از روش نوین زینترینگ با جرقه پلاسما (SPS) که یکی از روش‌های متالوژی پودر برای متراکم کردن پودر فلزات، سرامیک‌ها و یا مواد دیگر با اعمال جرقه پلاسما تحت فشار پرس و تفجوشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش توانایی دستیابی به ادغام و یکپارچه‌سازی پودر بدون ذوب کردن آن و از طریق فعال سازی حرارتی فرآیند انتقال جرم ناشی از کاهش سطح و انرژی مرز دانه امکان‌پذیر می‌باشد (یاداو و همکاران، ۲۰۱۱، کوریتا و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۹۶۵-۱۹۶۰).

گروهی از محققان بیان کرده‌اند که آسیابکاری مکانیکی باعث ایجاد مقدار زیادی تغییر فرم، چگالی بالایی از نایبایی‌ها و توزیع ذرات تقویت کننده در فاز زمینه می‌شود که سختی را افزایش می‌دهد و همچنین ریز شدن میکروساختار باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود (لتی و همکاران، ۱۹۹۶: ۴۶۴-۴۵۳، آدامیاک و همکاران، ۲۰۰۴: ۲۰۰۶-۲۰۰۲). و گروهی دیگر دریافته‌اند که تغییرات پودرها در فرآیند آسیابکاری موجب تغییر نامطلوب خواص فیزیکی و مکانیکی مواد پس از تولید قطعه می‌شود، به عنوان مثال چگالی و سختی به دست آمده از فشردن گرم پودرهای Ni و Al آسیابکاری شده کمتر از پودرهای آسیابکاری نشده است، علت این پدیده ناشی از عبوبی است که در اثر برخوردهای متوالی گلوله‌ها به ذرات پودر در ماده ایجاد می‌شود (مینگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۰۳-۲۰۰). در تحقیق صورت گرفته دیگر ۹۸ درصد پودر آلومینیوم خالص و ۲ درصد وزنی از نانو لوله‌های کربنی چند جداره را آماده و پس از آسیابکاری مخلوط حاصل در یک قالب استوانه‌ای تحت فشار ۳۷۵



مگاپاسکال فشرده شده و در نهایت در کوره‌ی معمولی زینتر شده است، مشاهده شده است که قطعه‌ی حاصل نسبت به قطعه‌ی بدون نانو لوله‌های کربنی از نظر سختی ویکرز با افزایش بیش از ۲ برابر روبرو شده و استحکام نهایی و تسلیم آن نیز افزایش یافته است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹: ۳۴۳۳-۳۴۲۷). در پژوهشی کامپوزیت‌هایی با فاز زمینه آلومینیوم ۲۰۲۴ و فاز تقویت-کننده‌ی نانو لوله‌های کربنی به روش متالوژی پودر ساخته شدند و توزیع یکنواخت نانو لوله‌ها در آلیاژ حاصل شده بود، نتایج بدست آمده نشان از افزایش قابل توجهی در سختی بود که این افزایش تابعی از درصد وزنی نانو لوله‌های به کار رفته بوده است، علت این افزایش قابل توجه را، توزیع مناسب نانو لوله‌ها در آلیاژ پایه است (پرزپوستامانت و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۹-۱۳). با این حال تاکنون بررسی‌های کمی روی تاثیر درصد افزایش فاز تقویت‌کننده‌ی نانو لوله‌های کربنی و نیز اثر تغییر قطر آنها بر فاز زمینه آلومینیوم سری ۷۰۶۸ صورت گرفته است، به همین دلیل در این مقاله پس از ساخت کامپوزیت‌هایی با فاز زمینه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ به روش SPS، با درصد و قطرهای متفاوتی از تقویت‌کننده‌ی نانولوله‌های کربنی، به بررسی تاثیر مقدار و قطر تقویت‌کننده بر خواص فیزیکی و مکانیکی چگالی، سختی و استحکام خمشی خواهیم پرداخت.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد اولیه

در این پژوهش از پودر آلومینیوم با خلوص بیش از ۹۹ درصد و اندازه دانه کمتر از ۱۰۰ میکرومتر و همچنین عناصر آلیاژی منیزیم، روی و مس با خلوص بالای ۹۷ درصد که همه این پودرها ساخت شرکت (Merck) آلمان می‌باشند و همچنین از ذرات تقویت‌کننده‌ی نانو لوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) ساخته شده در شرکت نانو مواد آمریکا (US Nano Materials Inc) با متوسط قطر ۱۰ و ۶۵ نانومتر و خلوص بالای ۹۵ درصد استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات ساختاری نانو لوله‌های کربنی، جدول (۲) مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی نانو لوله‌های کربنی و جدول (۳) ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ را نشان می‌دهند.

### جدول (۱): مشخصات ساختاری نانولوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs)		جزئیات
نمونه		
۲	۱	
>۹۵wt%	>۹۸ wt%	خلوص ( ذرات نانو کربن)
>۹۷wt%	>۹۹wt%	خلوص ( عنصر کربن)
۵۰-۸۰(nm)	۵-۱۵(nm)	قطر خارجی
۵-۱۵(nm)	۳-۵(nm)	قطر داخلی
۱۰-۲۰(μm)	۵۰(μm)	طول
سیاه	سیاه	رنگ
<۱/۵wt%	<۱/۵wt%	خاکستر
CVD	CVD	روش ساخت



جدول (۲): مشخصات فیزیکی و خواص مکانیکی نانو لوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs)		جزئیات
نمونه	۱	
۲	۱	مدول یانگ
( ۱۲۰۰ Gpa)	( ۱۲۰۰ Gpa)	استحکام کششی
( ۱۵۰ Gpa)	( ۱۵۰ Gpa)	رسانندگی گرمایی
۳۰۰۰ (w/m.k)	۳۰۰۰ (w/m.k)	هدایت الکتریکی
>۱۰۰ (s/cm)	>۱۰۰ (s/cm)	چگالی
۲/۶ (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۶ (g/cm <sup>3</sup> )	

جدول (۳): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸

Mg	Cu	Zn	Al	جزء
۲/۲-۳	۱/۶-۲/۴	۷/۳-۸/۳	۸۵/۴-۸۸/۱۴	درصد وزنی

## ۲-۲- روش تولید

در این پژوهش هدف ساخت هفت قطعه است، قطعه‌ی اول آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ (ترکیبی از آلومینیوم خالص و عناصر آلیاژی روی، منیزیم و مس)، می‌باشد و سایر قطعات به ترتیب ترکیباتی از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ با نیم، یک و دو درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی چند جداره با قطرهای متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر می‌باشند. پس از آماده سازی پودرها و نانولوله‌ها بر حسب درصدهای وزنی مورد نیاز، آن‌ها را در ظرفی حاوی اتانول قرار می‌دهیم و سپس با دستگاه اولتراسونیک شیکر، تحت امواج شدید فراصوت قرار داده تا به خوبی در اتانول پخش و همگن گردند و از هرگونه تجمع پودرها جلوگیری به عمل آید. در ادامه مخلوط حاصل را در کوره و در دمای ۳۲۳ درجه کلوین برای مدت ۲۴ ساعت قرار داده تا تقریباً همه اتانول و رطوبت آن حذف گردد. در مرحله بعد برای اختلاط پودرها، از آسیاب سیاره‌ای با انرژی بالا (شکل ۱) استفاده می‌شود. بنابراین جهت انجام فرآیند اختلاط، پودرهای توزین شده به داخل محفظه آسیابکاری (کاپ‌های فولادی) ریخته می‌شوند. جهت جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات پودر و تشکیل کلوخه در داخل آسیاب، از اتانول به عنوان عامل کنترل کننده ی فرآیند استفاده می‌شود. شایان ذکر است که در این مرحله برای این که هیچ گونه تغییر شکلی در ریزساختار پودرها در حین فرآیند اختلاط به وجود نیاید، نسبت وزنی گلوله به پودر، به صورت ۱۰ به ۱ می‌باشد (وزن گلوله‌ها ۱۰ برابر وزن پودر است). هم چنین سرعت چرخش دیسک برابر ۲۵۰ rpm می‌باشد. مدت زمان اختلاط تحت شرایط مذکور، با توجه به قطر متوسط پودرهای آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی، برابر با ۲۴ ساعت انتخاب شده است. از گاز آرگون نیز جهت جلوگیری از هرگونه اکسیداسیون ذرات در حین فرآیند اختلاط استفاده می‌شود (پارامترهای مرحله آسیابکاری در جدول (۴) نشان داده شده است). بعد از فرآیند اختلاط، مقدار اندکی از پودر برای انجام آنالیز پراش پرتوی ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی، نمونه برداری می‌شود. در صورتی که نتایج حاصل از این دو آنالیز، رضایت بخش باشد، در مرحله بعدی نوبت به فرآیند تفجوشی نمونه‌ها با استفاده از روش نوین و سریع تفجوشی با جرقه‌ی پلاسما می‌رسد. در این مرحله عملیات تفجوشی مخلوط پودرهای آلیاژ آلومینیوم



۷۰۶۸ و نانو لوله‌های کربنی چند جداره را با استفاده از دستگاه SPS (شکل ۲) با اعمال حاکثر فشار مکانیکی تک محوری  $30 \text{ Mpa}$ ، جریان الکتریکی مستقیم پالسی با چگالی  $7 \text{ A/mm}^2$ ، به مدت زمان ۴۵۰ ثانیه در دمای  $390$  درجه سانتی‌گراد انجام گردید (پارامترهای مرحله تفجوشی در جدول (۶) نشان داده شده است)، سپس بعد از پولیش کاری نمونه‌های ساخته شده جهت حصول اطمینان از فرآیند سنتز و تشکیل فاز مورد نظر، آنالیز پراش پرتوی ایکس و آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گردید. در جدول (۵) نحوه‌ی کد گذاری نمونه‌های ساخته شده طبق مواد تشکیل دهنده‌ی آنها بیان شده است.

#### جدول (۴): پارامترهای موثر در آسیابکاری پودر Al<sub>70</sub>C<sub>30</sub>-MWCNTs

سرعت آسیابکاری	۲۵۰ rpm
زمان آسیابکاری	۲۴h
نسبت وزن گلوله به پودر	۱۰:۱
قطر گلوله	۲۰ mm
جنس مواد گلوله	فولاد زنگ نزن
عامل کنترل فرآیندی	اتانول
اتمسفر کاری	آرگون



شکل (۱): دستگاه آسیابکاری ساخت شرکت Retsch آلمان استفاده شده در این پژوهش (پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران)

#### جدول (۵): نحوه شماره‌گذاری نمونه‌های ساخته شده براساس مقدار مواد ترکیبی در آنها

شماره نمونه	شرح
S <sub>0,0</sub>	قطعه‌ای شامل آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ بدون نانولوله‌های کربنی.
S <sub>0,5,10</sub>	کامپوزیت با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و نیم درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ نانومتر
S <sub>1,10</sub>	کامپوزیت با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ نانومتر
S <sub>2,10</sub>	کامپوزیت با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و دو درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ نانومتر
S <sub>0,5,65</sub>	کامپوزیت با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و نیم درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۶۵ نانومتر
S <sub>1,65</sub>	کامپوزیت با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۶۵ نانومتر
S <sub>2,65</sub>	کامپوزیت با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و دو درصد وزنی نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۶۵ نانومتر



جدول (۶): پارامترهای موثر در تفجوشی نمونه‌ها توسط دستگاه SPS

۳۰ Mpa	حداکثر فشار مکانیکی
۳۹۰°C	دمای تفجوشی
۷A/mm <sup>2</sup>	جریان الکتریکی
۴۵۰s	زمان تفجوشی



شکل (۲): تصویر دستگاه تفجوشی با جرقه پلاسما (SPS) استفاده شده در پژوهش (پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران).

## ۲-۳- تست و آزمون

## ۲-۳-۱- چگالی نمونه‌ها

چگالی تمامی نمونه‌ها به دو روش هندسی و غوطه‌وری در آب بر حسب قانون ارشمیدوس و طبق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\rho = M_1 / (M_2 - M_3) \quad (1)$$

$M_1$ : جرم نمونه خشک

$M_2$ : جرم نمونه‌ی ترشده

$M_3$ : جرم نمونه غوطه‌ور در آب

$\rho$ : چگالی نمونه

در رابطه (۱) برای محاسبه جرم نمونه‌ی تر شده، نمونه مورد نظر را به مدت ۴ ساعت در آب می‌جوشانیم و سپس نمونه را در همان آب به مدت ۲۴ ساعت نگه می‌داریم تا منافذ موجود در آن پر از آب شود، بعد از این مرحله نمونه را از آب خارج کرده و با دستمال آب روی سطح آن را پاک می‌کنیم، جرم نمونه در این حالت برابر جرم نمونه تر است. برای محاسبه جرم نمونه‌ی غوطه‌ور در آب از ترازوی ارشمیدوسی استفاده شد. و همچنین جهت محاسبه چگالی نظری نمونه‌های کامپوزیتی از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$\rho = \sum \rho_i \times x_i$$

(۲)

$\rho_i$ : چگالی فاز  $i$

$x_i$ : درصد فاز  $i$  در نمونه



### ۲-۳-۲- سختی نمونه‌ها

جهت اندازه‌گیری میزان سختی، آماده‌سازی نمونه‌ها با سمباده‌زنی، پولیش قطعات و عملیات اچ کردن به وسیله محلول ۵ درصد حجمی اسید HF صورت گرفت، سپس از روش ماکرو ویکرز طبق استاندارد ASTM-E92 مقدار سختی از میانگین ۷ اندازه‌گیری برای هر نمونه توسط دستگاه سختی سنجی (KOOPA Model:UV1) انجام گردید (شکل ۳). نیروی متناسب برای کامپوزیت‌های ساخته شده برابر ۱۵ کیلوگرم نیرو و زمان ماندگاری ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد، و محاسبه‌ی مقدار سختی طبق رابطه (۳) انجام شد.

$$H_v = 1.854 F/d^2 \quad (3)$$

$H_v$ : سختی ویکرز

$F$ : نیروی وارده بر حسب نیوتن

$d$ : میانگین قطرهای اثر فرورونده بر حسب میلی‌متر



شکل (۳): دستگاه سختی سنجی استفاده شده در پژوهش (پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران)

### ۲-۳-۳- استحکام خمشی نمونه‌ها

استحکام خمشی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM, C1161-02C و توسط دستگاه استحکام‌سنجی سه نقطه‌ای مدل (SANTAM) انجام گرفت (شکل ۴)، این دستگاه به طور همزمان از طریق نرم افزار اقدام به ثبت داده‌های نیرو در برابر جابه‌جایی، استحکام سه نقطه‌ای و ... می‌کند. اگر چه دستگاه مورد استفاده، استحکام سه نقطه‌ای را پس از انجام تست مربوطه گزارش می‌دهد، جهت افزایش اطمینان با قراردادن نمونه بر روی دو تکیه‌گاه ساده و وارد کردن نیروی متمرکز به وسط آن تا زمان شکست، نیز مقدار استحکام خمشی را مطابق رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\sigma \approx 3FL/2bd^2 \quad (4)$$

$\sigma$ : استحکام خمشی (استحکام سه نقطه‌ای) بر حسب مگاپاسکال

$F$ : حداکثر نیروی اعمالی در لحظه‌ی شکست بر حسب نیوتن

$L$ : فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه بر حسب میلی‌متر

$b$ : عرض نمونه بر حسب میلی‌متر

$d$ : ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر

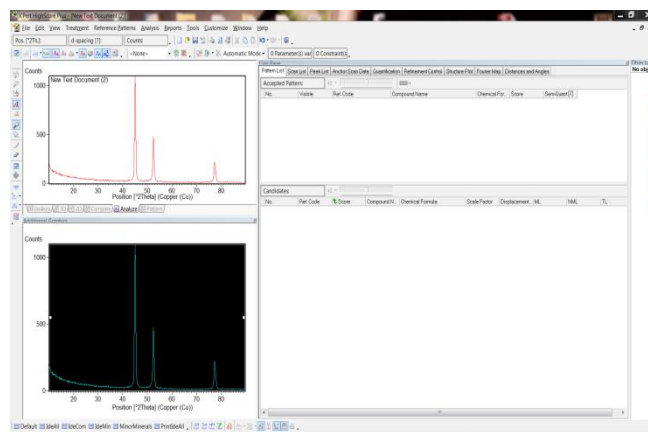


شکل (۴): دستگاه اندازه گیری استحکام سه نقطه‌ای استفاده شده در پژوهش (پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران)

### ۳- نتایج و مباحث

#### ۳-۱- تولید پودر آلیاژ فاز زمینه آلومینیوم ۷۰۶۸

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، آلیاژسازی آلومینیوم ۷۰۶۸ که شامل پودر آلومینیوم و عناصر آلیاژی روی، منیزیم و مس است با روش آسیابکاری مکانیکی انجام گرفت. از آنجایی که انتخاب صحیح مدت زمان فرآیند آلیاژسازی جهت دستیابی به پودری با بهترین مورفولوژی و خواص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بر همین اساس آسیابکاری برای تولید آلومینیوم ۷۰۶۸ در مدت زمان ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت انجام و سپس از هر یک از پودرهای حاصل الگوی پراش پرتو ایکس گرفته و توسط نرم افزار expert (شکل ۵) تحلیل شد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، در نمونه‌ای با ۶ ساعت زمان آسیاب، علاوه بر آلیاژ آلومینیوم چند آلیاژ دیگر که ترکیباتی چند جزئی از عناصر پایه آلیاژ می‌باشند، نیز تشکیل شده‌اند که این امر بدلیل کم بودن زمان آسیاب و به حالت پایدار نرسیدن پودر مذکور است. و همچنین شکل (۷) الگوی پراش اشعه ایکس را برای مدت زمان ۶، ۱۲ و ۲۴ آسیابکاری را نشان می‌دهد، نمودار (a) مربوط به پودری با ۶ ساعت آسیاب است که علاوه بر پیک آلیاژ آلومینیوم مورد نظر چند پیک دیگر که مربوط به ترکیبات دیگر می‌باشند نیز تشکیل شده‌اند، در حالی که در نمودار (b) با ۱۲ ساعت آسیابکاری شدت پیک ترکیبات نامطلوب کاهش و در نمودار (c) با ۲۴ ساعت آسیابکاری فقط آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ مشاهده می‌شود و دیگر ترکیبات نامطلوب موجود در نمودارهای (a) و (b) در نمودار (c) وجود ندارند. پس زمان ۲۴ ساعت برای آلیاژسازی مکانیکی زمان بهینه‌ای است و در آزمایشات تجربی مورد استفاده قرار گرفت.

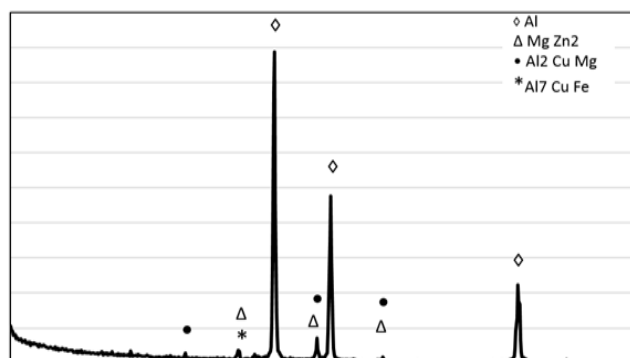


شکل (۵): تحلیل منحنی‌های الگوی پراش اشعه ایکس توسط نرم افزار xpert high score

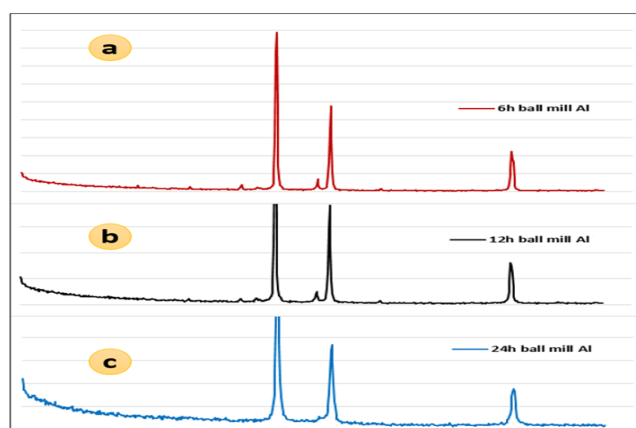




6h ball mill Al



شکل ۶- الگوی پراش اشعه ایکس برای پودر آلومینیوم ۷۰۶۸ با مدت زمان ۶ ساعت آسیابکاری



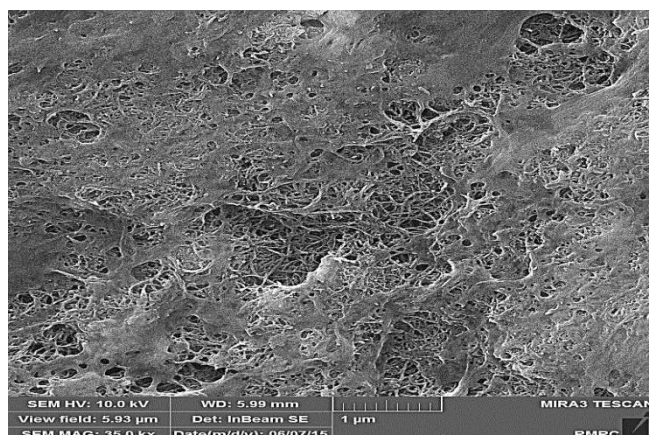
شکل ۷- الگوی پراش اشعه ایکس برای پودر آلومینیوم ۷۰۶۸ با مدت زمان ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعت آسیابکاری

### ۳-۲- بررسی ریز ساختار و مورفولوژی

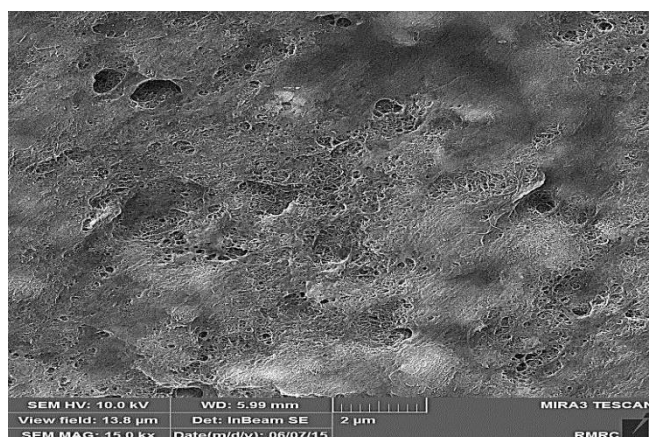
پس از ساخت نمونه‌ها توسط دستگاه تفجوشی با جرقه پلاسما (مطابق جدول ۵) و آماده‌سازی آنها جهت انجام تست فیزیکی و مکانیکی برای بررسی ریز ساختار و مورفولوژی که شامل نحوه توزیع نانو لوله‌های کربنی در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸، شکل نانو لوله‌ها و میزان حفره‌های موجود در نانو کامپوزیت‌هایی باشد، اقدام به گرفتن عکس‌هایی با بزرگنمایی‌های مختلف در حد میکرومتر و نانومتر توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی از برخی نمونه‌ها کرده ایم. با توجه به تکنیک‌هایی که برای ساخت قطعات در مرحله قبل از آسیاب با قرار دادن پودرها تحت امواج مافوق صوت و پس از آن در مرحله آسیاب با افزودن درصد مشخصی از اتانول به عنوان ایستگاه کنترل فرآیندی برای برقراری توازن میان جوش سرد و شکست به کار بردیم، اکنون می‌توانیم در صورت موثر بودن آن تکنیک‌ها، اثرشان را در ریز ساختار قطعات مشاهده کنیم. شکل (۸) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی با بزرگنمایی ۱ میکرومتر از قطعه‌ای با فاز زمینه آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با نیم درصد نانو لوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ نانومتر، شکل (۹) تصویر با بزرگنمایی ۲ میکرومتر از قطعه‌ای با فاز زمینه آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره با قطر متوسط ۱۰ نانومتر، شکل



(۱۰) تصویری با بزرگنمایی ۵ میکرومتر از قطعه‌ای با فاز زمینه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با دو درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره با قطر متوسط ۶۵ نانومتر و شکل (۱۱) تصویری با بزرگنمایی ۲۰۰ نانومتر از قطعه‌ای با فاز زمینه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره با قطر متوسط ۱۰ نانومتر به نمایش گذاشته شده است.



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی با بزرگنمایی ۱ میکرومتر از توزیع نانولوله‌های کربنی در آلیاژ پایه مربوط به نمونه‌ای با ۱٪ وزنی نانولوله کربنی با قطر متوسط ۱۰nm (مرکز پژوهش متالوژی رازی، کرج، ایران)

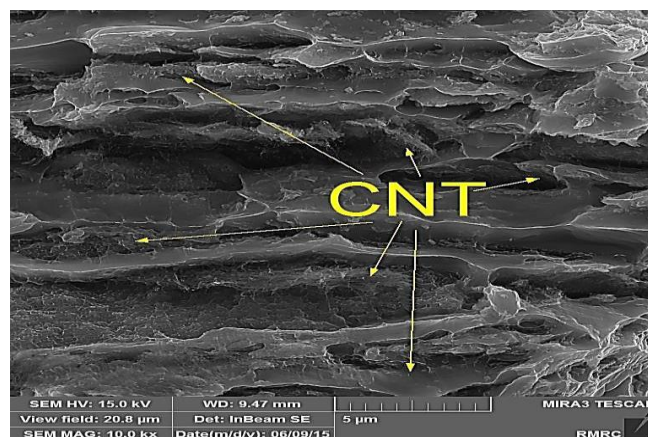


شکل (۹): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی با بزرگنمایی ۲ میکرومتر از توزیع نانولوله‌های کربنی در آلیاژ پایه مربوط به نمونه‌ای با ۰/۵٪ وزنی نانولوله با قطر متوسط ۱۰nm (مرکز پژوهش متالوژی رازی، کرج، ایران)

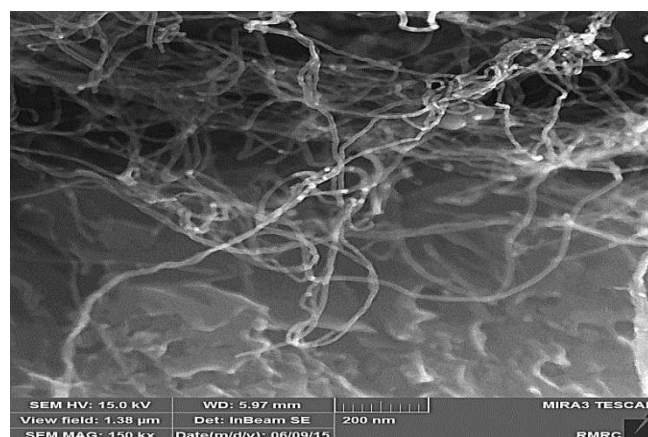
با توجه به تصاویر میکروسکوپی می‌توان دریافت که نانولوله‌های کربنی چند جداره به عنوان فاز تقویت کننده تقریباً به طور یکنواخت در سرتاسر آلیاژ پایه توزیع شده‌اند و حفره‌های نسبتاً کمی در نمونه‌های ساخته شده مشاهده می‌شود که نشان از یک چگالی نسبتاً ایده‌آل، امکان بهبود خواص مکانیکی در مراحل بعدی و اثر مثبت تکنیک‌های استفاده شده در ایجاد یک مخلوط همگن را تایید می‌کند. کلیه‌ی تصویر موجود در این بخش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی-



گسیل میدانی و از سطح مقطع شکست نمونه‌های کامپوزیتی گرفته شده تا اطلاعات دقیق‌تری را در مورد نحوه توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه‌ی آلومینیومی به دست ما برساند.



شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی با بزرگنمایی ۵ میکرومتر از شکل رشته‌ای مانند نانو لوله‌های کربنی در آلیاژ پایه مربوط به نمونه‌ای با ۲٪ وزنی نانولوله با قطر متوسط ۶۵nm (مرکز پژوهش متالوژی رازی، کرج، ایران)



شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی بزرگنمایی ۲۰۰ نانومتر از نانولوله‌ها در آلیاژ پایه در نمونه‌ای با ۱٪ وزنی نانولوله با قطر متوسط ۱۰nm (مرکز پژوهش متالوژی رازی، کرج، ایران)

۳-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی

۳-۳-۱- بررسی و تحلیل چگالی

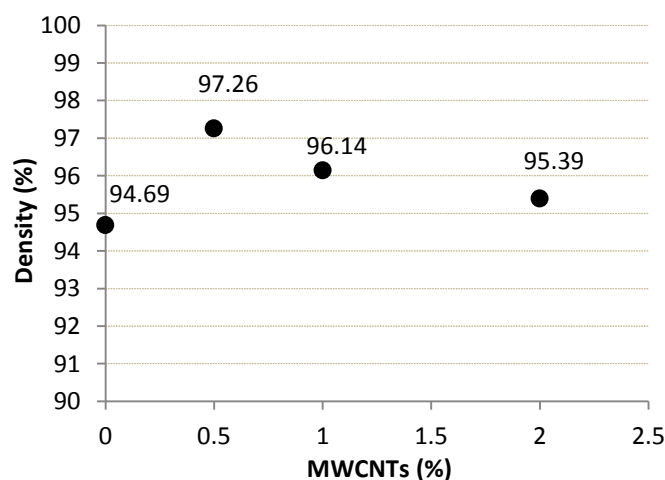
با استفاده از روشی که قبلاً برای محاسبه چگالی بیان شد، چگالی تئوری و تجربی برای هفت نمونه کامپوزیتی ساخته شده، محاسبه و در جدول (۷) بیان شد.



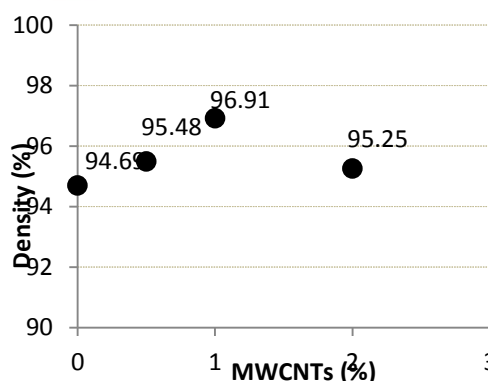
جدول (۷): اطلاعات مربوط به دانسیته و مقدار آن در نمونه‌ها

کد نمونه	جرم نمونه غوطه‌ور در آب (gr)	جرم نمونه خشک (gr)	جرم نمونه تر شده (gr)	اختلاف جرم تر و خشک نمونه (gr)	چگالی (gr/c تجربی) و چگالی (gr/c تجربی) $m^3$	چگالی (تجربی)/چگالی $\times 100$ (تئوری)
S <sub>0,0</sub>	۳۴/۴۷۵۸	۵۰/۳۶۳۷	۵۳/۱۳۸۰	۲/۷۷۴۳	۲/۶۹۸۷	۹۴/۶۹
S <sub>0,5,10</sub>	۳۶/۹۷۶۲	۵۵/۸۴۵۸	۵۷/۱۲۳۹	۱/۲۷۸۱	۲/۷۷۱۸	۹۷/۲۶
S <sub>1,10</sub>	۳۴/۱۴۲۵	۵۰/۵۲۴۹	۵۲/۵۸۲۷	۲/۰۵۷۸	۲/۷۳۹۹	۹۶/۱۴
S <sub>2,10</sub>	۳۱/۹۸۷۲	۴۶/۶۷۹۲	۴۹/۱۵۷۴	۲/۴۷۸۲	۲/۷۱۶۶	۹۵/۳۹
S <sub>0,5,65</sub>	۳۱/۷۱۶۳	۴۶/۴۱۸۰	۴۸/۷۷۴۱	۲/۳۵۶۱	۲/۷۲۱۲	۹۵/۴۸
S <sub>1,65</sub>	۳۸/۷۳۷۲	۵۸/۲۴۹۳	۵۹/۸۲۷۳	۱/۵۷۸۰	۲/۷۶۱۹	۹۶/۹۱
S <sub>2,65</sub>	۳۴/۹۸۳۴	۵۱/۱۵۴۲	۶۳/۸۲۷۳	۱/۸۶۴۱	۲/۷۱۴۶	۹۵/۲۵

در ستون آخر جدول (۷) مشخص است که در هر یک از نمونه‌های ساخته شده به چند درصد از چگالی تئوری دست یافته‌ایم. علاوه بر جدول فوق که شامل اطلاعات جامعی در مورد خواص فیزیکی از جمله وزن ظاهری، وزن تر، وزن خشک و همچنین چگالی در قطعات ساخته شده می‌باشد، در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودارهای درصد چگالی‌های بدست آمده نسبت به چگالی تئوری برای دو قطر مختلف نانولوله‌ها به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱۲- نمودار چگالی نسبی کامپوزیت‌های آلومینیوم ۷۰۶۸- نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ نانومتر



شکل ۱۳- نمودار چگالی نسبی کامپوزیت‌های آلومینیوم ۷۰۶۸- نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۶۵ نانومتر

همان طور که ملاحظه می‌شود، در تمامی قطعات ساخته شده به یک درصد قابل قبولی از چگالی تئوری دست یافته‌ایم (بالای نود و چهار درصد)، که این نشان از انتخاب دیتاهای بهینه برای خواص مختلف از قبیل دما، فشار، زمان و غیره در دو بخش آسیاب سیاره ای با انرژی بالا و تفجوشی با جرقه‌ی پلاسما می‌باشد. افزون بر این، دستیابی به چنین چگالی‌های بالایی موجب می‌شود که خواص مکانیکی و فیزیکی مورد مطالعه در این پژوهش تا حد بسیار زیادی به آنچه در حقیقت وجود دارد نزدیک باشند. بالاترین چگالی‌های بدست آمده در کامپوزیت‌هایی با زمینه‌ی آلومینیوم ۷۰۶۸ و فاز تقویت کننده‌ی نانوله کربنی با قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر، به ترتیب مربوط به آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با ۵/۰ و ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی می‌باشد.

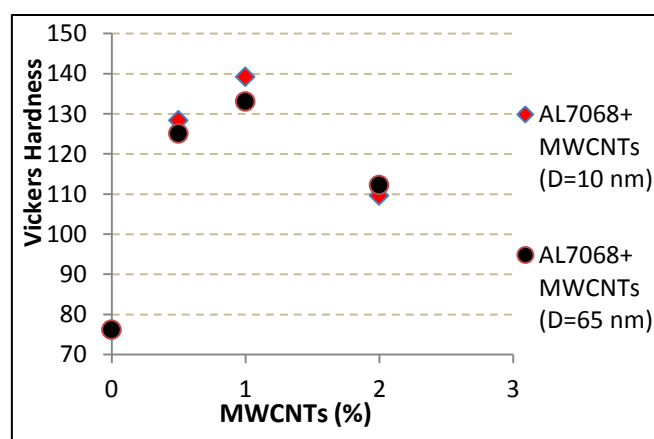
### ۳-۳-۲- بررسی و تحلیل سختی

سختی، یکی از خواص مکانیکی ماده است که در کارایی آن تاثیر بسزایی دارد. معمولاً قطعات ساخته شده به روش متالورژی پودر دارای تخلخل‌های زیادی هستند، که باعث سختی پایین‌تر آنها نسبت به نمونه بالک و پراکندگی زیاد در نتایج سختی‌سنجی است. به همین دلیل در این پژوهش سختی‌سنجی از میانگین ۷ تست بدست آمده، تا نتایج قابل اعتمادتری در اختیار داشته باشیم. نتایج و پارامترهای سختی در جدول (۸) آمده است.

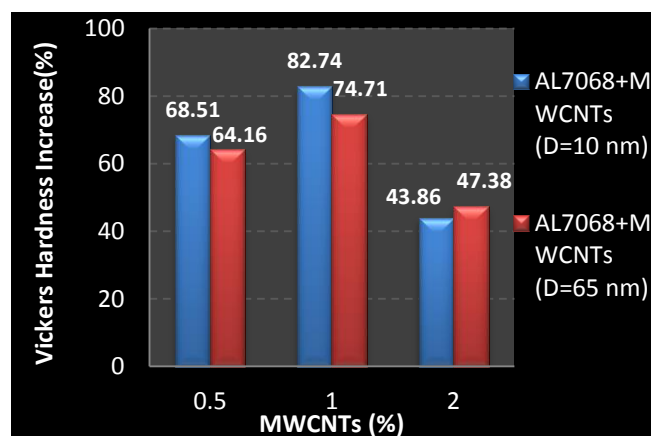
جدول (۸): اطلاعات مربوط به سختی ویکرز و مقدار آن در نمونه‌ها

کد نمونه	نیروی وارده (N)	میانگین قطر اثر نیرو (mm)	سختی ویکرز	درصد افزایش سختی نسبت به نمونه بدون نانو لوله‌های کربنی
S <sub>0,0</sub>	۱۵۰	۱/۹۱	۷۶/۱۹	۰
S <sub>0,5,10</sub>	۱۵۰	۱/۴۷	۱۲۸/۳۹	۶۸/۵۱
S <sub>1,10</sub>	۱۵۰	۱/۴۱	۱۳۹/۲۳	۸۲/۷۴
S <sub>2,10</sub>	۱۵۰	۱/۵۹	۱۰۹/۶۱	۴۳/۸۶
S <sub>0,5,65</sub>	۱۵۰	۱/۴۹	۱۲۵/۰۷	۶۴/۱۶
S <sub>1,65</sub>	۱۵۰	۱/۴۵	۱۳۳/۱۱	۷۴/۷۱
S <sub>2,65</sub>	۱۵۰	۱/۵۷	۱۱۲/۲۹	۴۷/۳۸

مقادیر بدست آمده برای سختی در جدول (۸) نشان می دهد که نمونه ای با فاز زمینه ی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ و یک درصد وزنی نانولوله ی کربنی چند جداره با قطر متوسط ۱۰ نانومتر، بیشترین مقدار سختی را در میان کلیه قطعات دارا می باشد و بعد از آن نیز نمونه ی مشابه نمونه ی ذکر شده برای افزودنی نانولوله با قطر متوسط ۶۵ نانومتر دارای بالاترین سختی ویکرز می باشد. برای رسیدن به درک عمیق تری از نتایج بدست آمده، مقادیر سختی را برای دو قطر متفاوت نانولوله در گرافهایی مطابق شکل (۱۴) و درصد افزایش آن نسبت به نمونه بدون فاز تقویت کننده در شکل (۱۵) رسم نموده ایم.



شکل (۱۴): مقادیر سختی ویکرز برای نمونه های تقویت شده آلومینیوم ۷۰۶۸ با نانولوله های کربنی با قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر



شکل (۱۵): مقدار درصد افزایش سختی ویکرز نسبت به نمونه خالص برای نمونه های آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با نانولوله ی کربنی با قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر

در مقایسه ی سختی برای دو قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر به این نتیجه دست یافتیم که هر چه اندازه ی قطر متوسط نانولوله های کربنی به عنوان فاز تقویت کننده کوچک تر باشد، سختی نمونه ی بدست آمده بیشتر است. همچنین اگر میزان نانولوله ی بکار رفته از حد معینی تجاوز کند باعث ایجاد یک تجمع نسبی از نانولوله ها نسبت به نمونه حاوی درصد بهینه می شود که این امر خود عامل دیگری در بروز اثر منفی بر سختی می باشد.



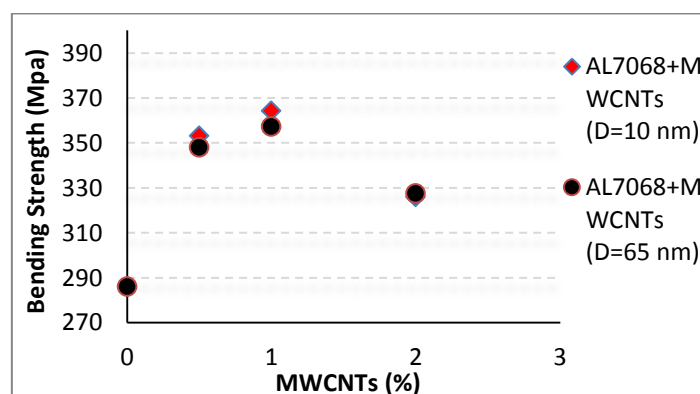
## ۳-۳-۳- بررسی و تحلیل استحکام خمشی

نتایج و پارامترهای استحکام خمشی کامپوزیت‌های ساخته شده در جدول (۹) درج شده است.

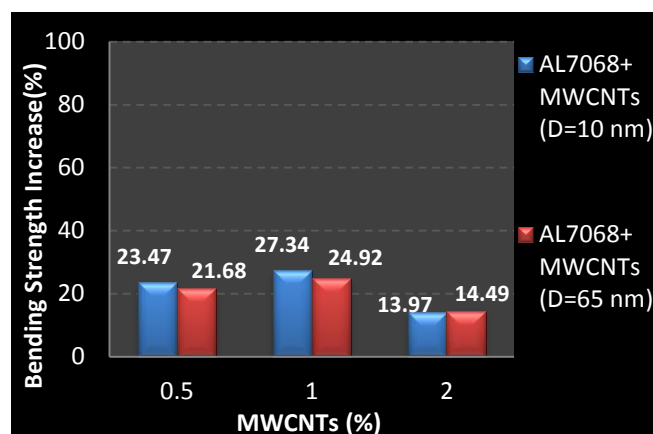
جدول (۹): اطلاعات مربوط به استحکام خمشی و مقدار آن در نمونه‌ها

کد نمونه	طول نمونه (mm)	عرض نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	نیروی شکست (N)	استحکام خمشی (mm)	درصد افزایش استحکام خمشی نسبت به نمونه بدون نانو لوله‌های کربنی (%)
S <sub>0,0</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۳۶۳/۴۵	۲۸۶/۰۰	۰
S <sub>0,5,10</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۳۸۳/۳۹	۳۵۳/۱۲	۲۳/۴۷
S <sub>1,10</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۷۳۶/۱۶	۳۶۴/۱۹	۲۷/۳۴
S <sub>2,10</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۵۵۳/۸۶	۳۲۵/۹۵	۱۳/۹۷
S <sub>0,5, 65</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۶۵۸/۹۸	۳۴۸/۰۰	۲۱/۶۸
S <sub>1, 65</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۷۰۳/۱۷	۳۵۷/۲۷	۲۴/۹۲
S <sub>2, 65</sub>	۱۶	۵/۶۵	۴/۵۰	۱۵۶۰/۹۷	۳۲۷/۴۴	۱۴/۴۹

با تامل در مقادیر استحکام خمشی بدست آمده، مشاهده می‌شود که استحکام خمشی برای نمونه‌ای با فاز زمینه‌ی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ با ۱ درصد فاز تقویت‌کننده‌ی نانو لوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ نانومتر بیش‌ترین مقدار را دارد. همچنین می‌توان از داده‌های بدست آمده این نتیجه را استخراج کرد که برای درصد‌های وزنی مشابه از نانولوله‌هایی با دو قطر متفاوت همواره تقویت‌کننده‌های ریزتر که قطر کمتری دارند، نقش استحکام بخشی را بهتر ادا می‌کنند که این پدیده می‌تواند به علت همگنی بیشتر ایجاد شده در کامپوزیت به علت قطر ریزتر آن‌ها باشد. اما برای دو نمونه با دو درصد متفاوت از نانولوله‌ها، نمونه‌ای با درصد تقویت‌کننده‌ی بیشتر، استحکام بیشتری را دارا می‌باشد، مگر این که از درصد وزنی بهینه عبور کرده باشیم که به نظر می‌رسد در این آزمایش عبور از ۱ درصد به معنای عبور از درصد بهینه‌ی تقویت‌کننده می‌باشد. شکل (۱۶) مقادیر استحکام خمشی برای آلومینیوم ۷۰۶۸ با تقویت‌کننده‌ی نانو لوله‌های کربنی با دو قطر ۱۰ و ۶۵ نانومتر و شکل (۱۷) درصد افزایش استحکام خمشی نمونه‌های با تقویت‌کننده نانو لوله‌های کربنی نسبت به نمونه خالص آلومینیوم ۷۰۶۸ ساخته شده را نشان می‌دهند.



شکل (۱۶): مقادیر استحکام خمشی برای نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر



شکل (۱۷): نمودار درصد افزایش مقادیر استحکام خمشی نسبت به نمونه خالص برای نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی با قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر

نمونه‌ی منتخب در آزمون استحکام خمشی نیز بالاترین سختی را از خود نشان داده است، و مدعی بر این است که هر چه اندازه ریز دانه‌های نانو لوله‌های کربنی کوچک‌تر باشند، مرز دانه بیشتری در تماس با ذرات فاز زمینه خواهند داشت که نتیجه آن بهبود خواص مطالعه شده در این پژوهش است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

انجام این پژوهش به نتایج زیر منجر شد:

- ۱- در فرآیند آسیابکاری، سرعت بالا موجب جوش سرد بهتر و نسبت گلوله به پودر بالا موجب شکست بیشتر می‌شود، در نتیجه با انتخاب حد بالای پارامترهای مذکور تعادل مناسبی بین شکست و جوش سرد به وجود می‌آید.
- ۲- در این تحقیق نشان داده شد که با اعمال امواج فراصوت به مخلوط مورد نظر از پودرهای آلیاژی قبل از مرحله‌ی آلیاژسازی مکانیکی، می‌توان از تجمع پودرهای آلیاژی جلوگیری کرد و مانع ایجاد خوشه‌ها، شد. علاوه بر این، توزیع مناسب نانولوله‌ها در فاز زمینه از مزایای دیگر اعمال آن امواج است که موجب می‌شود ساختارشان در مرحله‌ی آلیاژسازی مکانیکی، تقریباً دست نخورده باقی بماند.
- ۳- استفاده از اتانول به عنوان فاز کنترل فرایندی در مرحله آسیاب نه تنها تعادل بین جوش سرد و شکست در پودرها را برقرار می‌کند، بلکه از بوجود آمدن فاز بین فلزی در این مرحله جلوگیری می‌کند.
- ۴- در این پژوهش به این نتیجه رسیدیم که استفاده از روش SPS جهت تفجوشی و ساخت قطعات کامپوزیتی با فاز زمینه‌ی آلومینیوم و تقویت کننده‌ی نانو لوله‌های کربنی چند جداره روش مناسبی است و این ادعا را می‌توان با توجه به چگالی‌های بالای نمونه‌های ساخته شده اثبات کرد.





۵- نتایج بدست آمده از آزمون سختی بیانگر این است که نمونه‌ای با یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره با قطر متوسط ۱۰ نانومتر، بیش‌ترین میزان سختی ویکرز را به خود اختصاص داده است. این نتیجه می‌تواند پیام آور دو نکته‌ی بسیار مهم باشد: اول این که هر چه سایز نانولوله‌ی انتخابی کوچکتر باشد، سختی قطعه‌ی بدست آمده بیشتر می‌شود که این پدیده نتیجه‌ی همگنی و یکنواختی بیشتر در نانوکامپوزیت بدست آمده است. دومین نکته‌ی ای که از نتیجه‌ی آزمون سختی می‌توانیم دریابیم این است که به نظر می‌رسد با توجه به افت سختی در نمونه‌هایی با دو درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی برای دو قطر متوسط ۱۰ و ۶۵ نانومتر، درصد وزنی بهینه برای به کار گرفتن نانولوله‌ها در بازه‌ای بین یک و دو درصد می‌باشد.

۶- نتایج به دست آمده برای آزمون استحکام خمشی تقریباً از لحاظ روند افزایش و کاهش، مشابه آزمون سختی می‌باشد که این امر می‌تواند به دلیل اندک بودن و یا نادر بودن عیوب در قطعات باشد، زیرا بروز هر عیبی در قطعه می‌تواند تمرکز تنش ایجاد کند و اثر منفی بر خواص مکانیکی بگذارد. در این آزمون نیز بیشترین استحکام خمشی برای نمونه‌ای با یک درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند جداره با قطر متوسط ۱۰ نانومتر بدست آمد. بر این اساس می‌توان این نمونه را در میان ۷ قطعه‌ی ساخته شده به عنوان نمونه‌ی منتخب از لحاظ خواص مکانیکی مطالعه شده در نظر گرفت.

۷- به طور کلی استفاده از نانولوله‌های کربنی چند جداره بعنوان تقویت کننده آلیاژ آلومینیوم ۷۰۶۸ باعث بهبود خواص مکانیکی بحث شده می‌شود. و همچنین برای کامپوزیت‌های ساخته شده با فاز زمینه آلومینیوم ۷۰۶۸ بیشترین افزایش سختی برابر ۸۲/۷۴ درصد و استحکام خمشی برابر ۲۷/۳۴ درصد نسبت به نمونه خالص در نمونه‌ای بوده است که نانولوله‌های کربنی به قطر ۱۰ نانومتر در آنها به مقدار ۱ درصد وزنی است.

## منابع

- 1-Adamiak, M., Fogagnolo, J.B., Ruiz-Navas, E.M., Dobrza? ski, L.A., and Torralba, J.M. (2004). *Mechanically milled AA6061/(Ti3Al)P MMC reinforced with intermetallics – the structure and properties*, Journal of Materials Processing Technology 155–156, pp. 2002-2006.
- 2-Durai, T. G., Karabi, D., and Siddhartha, D. (2007). *Synthesis and Characterization of Al Matrix Composites Reinforced by in Situ Alumina Particulates*, Materials Science and Engineering A, Vol. 445-446, pp. 100-105.
- 3-Fahrenheitz, W. G., O’Keefe, M. J., Zhou, H., and Grant, J. T. (2002). *Characterization of Cerium Based Conversion Coatings for Corrosion Protection of Aluminum Alloys*, J. Surf. Coat. Technol, Vol. 2, pp. 155-208.
- 4-Fogagnolo, J. B., Velasco, F., Robert, M.H., and Torralba, J.M. (2003). *Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders*, Materials Science and Engineering A 342, pp. 131-143.
- 5-Hatch, J. E. (1984). *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, ASM.
- 6-Johnson, B. Y., Edington, J., and O’Keefe, M. J. (2003). *Effect of Coating Parameters on the Microstructure of Cerium Oxide Conversion Coating*, J. Materials Science and Engineering A361, Vol. 7, pp. 225.
- 7-Kurita, H., Kwon, H., Estili, M., and Kawasaki, A. (2011). *Multi-walled carbon nanotubes-aluminum matrix composites prepared by combination of hetero-agglomeration method, spark plasma sintering and hot extrusion*, Materials transactions A 10, Vol. 52, pp. 1960-1965.

- 8-Lti, L., Lai, M.O., and Li, G. (1996). *Influence of sintering process on the mechanical property and microstructural of ball milled composite compacts*, Materials Research Bulletin, 31, pp. 453-464
- 9-Meng, J., Jia, C., and He, Q. (2006). *Effect of mechanical alloying on the structure and property of Ni3Al fabricated by hot pressing*, Journal of Alloys and Compounds 421, 200-203.
- 10-Palomino, L. E. M., Aoki, I. V., and de Melo, H. G. (2006). *Microstructural and Electrochemical Characterization of Ce Conversion Layers Formed on Al Alloy 2024-T3 Covered with Cu-rich Smut*, J. Electrochim. A 51, Vol. 3, pp. 208.
- 11-Perez-bustamante, R., Miki-Yoshida, M., and Martínez-Sánchez, R. (2013). *Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/AL2024 composites, produced by mechanical alloying*, Materials Characterization 75(2013) 13-19.
- 12-Razavi Hesabi, Z., Simchi, A., and Reihani, S. M. (2006). *Structural Evolution During Mechanical Milling of Nanometric and Micrometric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced Al Matrix Composites*, Materials Science and Engineering A, Vol. 428, pp. 159-168.
- 13-Wang, L., Choi, H., Myoung, J. M., and Lee, W. (2009). *Mechanical alloying of multi-walled carbon nanotubes and aluminium powders for the preparation of carbon/metal composites*, C A R B ON 4 7 (2009) 3427 –3433.
- 14-Yadav, V. (2011). *Spark plasma sintering of aluminum matrix composites (Master of science)*, Oklahoma state university.
- 15-Yu, P., Zhang, L.C., Zhang, W.Y., Das, J., Kim, K.B., and Eckert, J. (2007). *Interfacial reaction during the fabrication of Ni60Nb40 metallic glass particles-reinforced Al based MMCs*, Materials Science and Engineering A 444, pp. 206-213.