

## بررسی مکانیزم شکست در کامپوزیت‌های آلومینیوم-نانولوله کربنی تولید شده به روش پلاسمای جرقه‌ای (SPS)

داود خادمی\* و ابوالفضل باباخانی

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۰۵/۰۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۰۷/۰۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۸/۱۲

### چکیده

در تحقیق حاضر، کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با درصد‌های مختلف نانولوله کربنی (۵-۰ wt.%) به روش SPS که یکی از روش‌های جدید تفجوشی پودرهای فلزی است تولید شده‌اند. ریزساختار کامپوزیت‌های تولید شده و سطح شکست آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و نانولوله‌های کربنی استفاده شده برای ساخت کامپوزیت‌ها با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی، آزمون استحکام فشاری و آزمون سختی‌سنجی بر روی نمونه انجام شد. نتایج حاکی از آن است که روش SPS روشی مناسب برای تولید کامپوزیت مورد نظر است و استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان ماده تقویت کننده در زمینه آلومینیوم در مقدار بهینه (حدود ۱ درصد وزنی و کمتر از این مقدار) باعث افزایش سختی تا ۸۰ درصد، استحکام تا حدود ۳۰ درصد شده است. مقادیر بیشتر از ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به علت آگلومره شدن، افت خواص را به همراه دارند.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت زمینه فلزی، نانولوله کربنی، پلاسمای جرقه‌ای SPS، سختی، استحکام فشاری.

### ۱- مقدمه

فیزیکدانان، دانشمندان علم مواد را به خود جلب کرده است. نانولوله‌های کربنی تنها مواد ریزساختاری هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی فوق‌العاده‌ای دارند. از جمله این خواص مدول الاستیسیته بسیار بالا، رسانایی گرمایی و رسانایی الکتریکی قابل توجه را می‌توان ذکر کرد [۲]. به عنوان مثال نانولوله‌های کربنی مدول الاستیسیته بسیار بالایی دارند (۱ TPa)، و این در صورتی است که مدول الاستیسیته الماس که سخت‌ترین ماده جهان است چیزی در حدود ۱/۲ TPa است [۳]. استحکام یک نانولوله هم

امروزه در بیشتر صنایع مثل صنایع هوافضا، خودروسازی و غیره بیشتر بدنبال گسترش مواد با خصوصیات ویژه هستند. خصوصیات هم‌چون استحکام بالا در کنار انعطاف‌پذیری خوب، دانسیته کم و مقاومت به سایش بالا، محققان را به سمت تولید مواد کامپوزیتی متمایل کرده است [۱]. خواص منحصر بفرد نانولوله‌های کربنی از زمان کشف و تولید، توجه محققان زیادی از جمله شیمی‌دانان،

\*عهده‌دار مکاتبات: داود خادمی

نشانی: مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مواد و متالورژی

تلفن: ۰۵۱-۳۸۸۰۳۰۰۰، دورنگار: ۰۵۱-۳۸۸۰۳۰۰۰، پست الکترونیکی: [dav.khademi@gmail.com](mailto:dav.khademi@gmail.com)

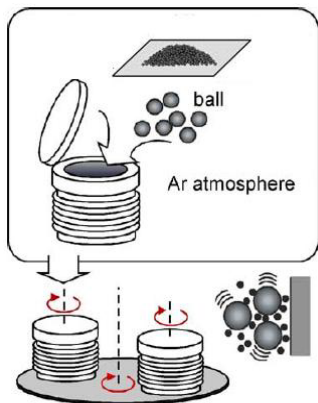
آن را فشرده می‌سازند. اعمال جریان الکتریکی به توده پودر، نیروی محرکه لازم برای تفجوشی را فراهم کرده و باعث می‌شود فرآیند تولید در زمانی اندک به اتمام رسد [۱۶]. ویژگی مهم این روش تفجوشی فلزات و سرامیک‌ها به خصوص مواد دیرگداز تا نزدیک چگالی تئوری در زمانی اندک می‌باشد [۱۷]. وجه تمایز این روش با روش‌های سنتی تفجوشی در متالورژی پودر عبور جریان الکتریکی از درون توده پودر و محفظه نگهدارنده آن برای تولید حرارت می‌باشد. تفجوشی به این روش شامل دو مکانیزم عمده است. اول اعمال جریان الکتریکی از درون توده پودر رسانا باعث ایجاد جرقه در بین ذرات شده که یک منطقه موضعی با درجه حرارت خیلی بالا ایجاد می‌کند، دوم بر طبق قانون ژول عبور جریان الکتریکی از مواد رسانا در اثر مقاومت الکتریکی تولید حرارت می‌کند [۱۸]. همین موضوع اساس و شالوده روش تفجوشی به کمک جریان الکتریکی می‌باشد این روش بدلیل برتری‌های تکنیکی و اقتصادی که نسبت به روش‌های معمول تفجوشی دارا می‌باشد جذابیت خاصی برای محققین پیدا کرده است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به نرخ گرمایش سریع‌تر، دمای تفجوشی پایین‌تر، زمان کمتر نگهداری در دما، تفجوشی موادی که به سختی تفجوشی می‌گردند، عدم نیاز به مواد کمکی برای تفجوشی، عدم نیاز به فشرده کردن پودر پیش از تفجوشی، حساسیت کمتر به ویژگی‌های اولیه پودر و بهبود خواص مواد تفجوشی شده اشاره کرد [۱۹-۲۱]. در تحقیق حاضر کامپوزیت آلومینیوم-نانولوله کربنی به روش SPS تولید شده است.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه استفاده شده در انجام تحقیق حاضر شامل پودر آلومینیوم خالص (خلوص ۹۹٪، اندازه دانه  $45 \mu\text{m}$ ) تهیه شده از شرکت مرک و نانولوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) با قطر  $80-50 \text{ nm}$  و طولی حدود  $10-15 \mu\text{m}$  می‌باشند. تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌های کربنی چند دیواره استفاده شده در ساخت کامپوزیت مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور تولید کامپوزیت آلومینیوم-نانولوله کربنی با درصد‌های وزنی مختلف از نانولوله کربنی

۱۰ الی ۱۰۰ برابر بیشتر از قوی‌ترین فولادها گزارش شده است (۱۰ الی ۶۰ GPa). خواص مکانیکی فوق‌العاده نانولوله کربنی بدلیل استحکام بالای پیوندهای کربن-کربن اجزاء تشکیل دهنده آن و ساختار شبکه‌ای تقریباً کامل آن است [۴،۵]. همچنین دانسیته کم نانولوله کربنی، که برای نانولوله‌های تک دیواره  $1/2 \text{ g/cm}^3$  و برای نانولوله‌های چند دیواره بیشتر از  $1/8 \text{ g/cm}^3$  گزارش شده است [۶،۷] که باعث استفاده از آنها به عنوان تقویت کننده در زمینه‌های فلزی و پلیمری جهت بهبود خواص مکانیکی این مواد کامپوزیتی شده است [۸]. در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی، آلومینیوم بخاطر خصوصیتی همچون انعطاف‌پذیری بالا، دانسیته پایین و مقاومت به خوردگی بالا، جذابیت بیشتری داشته است [۹] که با پخش کردن نانولوله‌های کربنی در زمینه آلومینیومی باعث بهبود خواص مکانیکی نسبت به آلومینیوم خالص می‌شود [۱۰]. روش‌های مختلفی به منظور تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد با توجه به آگلومره شدن شدید نانولوله‌های کربنی، توزیع آنها در زمینه فلزی با روش‌های معمولی تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی مثل روش‌های ذوبی مشکل بوده است علی‌رغم موارد ذکر شده کامپوزیت‌های آلومینیوم-نانولوله کربنی به روش‌های مختلفی تولید شده‌اند. بطور مثال لاها و همکارانش [۱۱] کامپوزیت ذکر شده را به روش پلاسما اسپری تولید کردند و نشان دادند که نانولوله‌های کربنی باعث افزایش قابل توجه سختی زمینه آلومینیومی می‌شوند. در نانوکامپوزیت‌های آلومینیوم-نانولوله کربنی تهیه شده به روش تزریق مذاب، حضور نانولوله‌های کربنی باعث افزایش ۱۵۰٪ در میکروسختی و کاهش ۳۹٪ ضریب اصطکاک شده است [۱۲]. دنگ و همکارانش [۱۳] کامپوزیت آلومینیوم-نانولوله کربنی را با روش متالورژی پودر تهیه کردند و افزایش ۷۸٪ در میکروسختی نسبت به زمینه فاقد نانولوله کربنی را مشاهده کردند. از جمله روش‌هایی که به سرعت جهت تولید محدوده وسیعی از مواد پیشرفته مثل نانوکریستال‌ها، نانوکامپوزیت‌ها و غیره توسعه یافته است روش SPS است [۱۴،۱۵]. در این روش، پودر به داخل قالبی استوانه‌ای شکل از جنس گرافیت و یا مواد عایق ریخته شده و دو پانچ از بالا و پایین

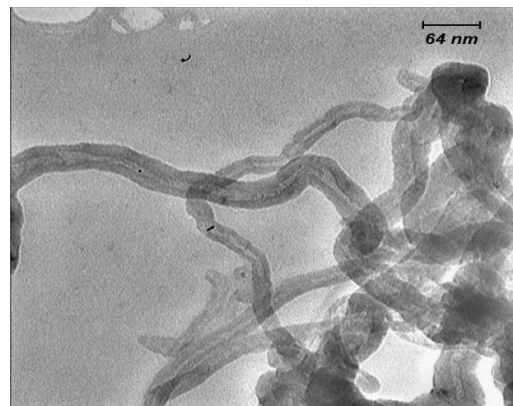
تفجوشی پودر ذکر شده با استفاده از دستگاه SPS در محیط خلاء ( $10^{-2}$  torr) با اعمال جریان الکتریکی مستقیم پالسی با دانسیته  $7 \text{ A/mm}^2$  به مدت زمان ۴۵۰ ثانیه، با اعمال همزمان فشار تک محوری ۳۲ MPa در دمای  $560^\circ \text{C}$  انجام شود.



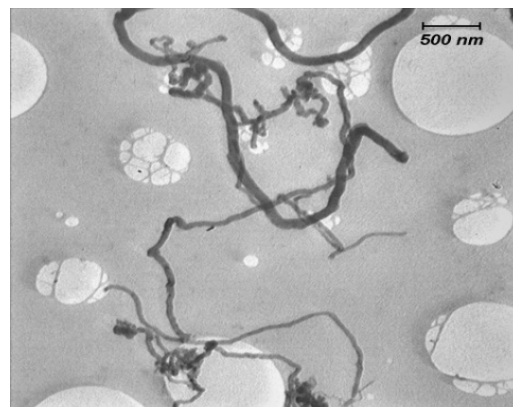
شکل ۲: شماتیکی از نحوه قرار گرفتن گلوله‌ها و چرخش ظرف‌ها در دستگاه آسیاکاری.

یکی از مهمترین ویژگی‌های استفاده از روش SPS سرعت گرمایش بسیار بالای این روش نسبت به روش‌های معمولی تفجوشی و همچنین دمای کمتر تفجوشی کردن پودر مورد نظر است. که در تحقیق حاضر بررسی تغییرات دما در حین تفجوشی پودر آلومینیوم-نانولوله کربنی با استفاده از ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری شد. برای این منظور در جداره بیرونی قالب گرافیتی حفره‌ای به قطر ۳ mm ایجاد شد تا ترموکوپل درون این حفره قرار گیرد و در تماس با قالب گرافیتی باشد. تغییرات دمای نمونه با گذشت زمان بوسیله سیستم داده‌گیر Advantech 4718 با قابلیت ثبت حداقل ۱۰ داده در ثانیه ثبت گردید. برای محاسبه سرعت گرمایش متوسط، دمایی که تفجوشی در آن انجام شده بر کل زمان تفجوشی تقسیم شد. نمودار تغییرات سرعت گرمایش لحظه‌ای با محاسبه مشتق نمودار دما-زمان رسم شد. پس از تفجوشی کردن پودرهای مورد نظر در دمای  $560^\circ \text{C}$ ، جریان الکتریکی قطع شده و نمونه بصورت طبیعی در محیط خلاء سرد شد. در نهایت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۶ mm و طول ۱۰ mm تولید شدند. به منظور بررسی تاثیر مقدار نانولوله کربنی بر

باید نانولوله‌های کربنی به صورت یکنواخت در بین ذرات پودر آلومینیوم پخش شوند که به این منظور از فرآیند آسیاکاری گلوله‌ای ماهواره‌ای استفاده شد که شماتیک دستگاه در شکل ۲ آورده شده است. آسیاکاری پودر آلومینیوم به همراه تقویت کننده (نانولوله کربنی) در محیط گاز آرگون به مدت زمان یک ساعت با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه و با نسبت وزن گلوله به پودر (۱۰:۱) انجام شد. همچنین در طی آسیاکاری به منظور جلوگیری از ذوب یا بهم چسبیدن پودرها، یا چسبیدن ذرات پودر به گلوله‌ها و یا دیواره ظرف از متانول به عنوان عامل کنترل کننده (PCA) با درصد وزنی ۲٪ استفاده شد.



(a)



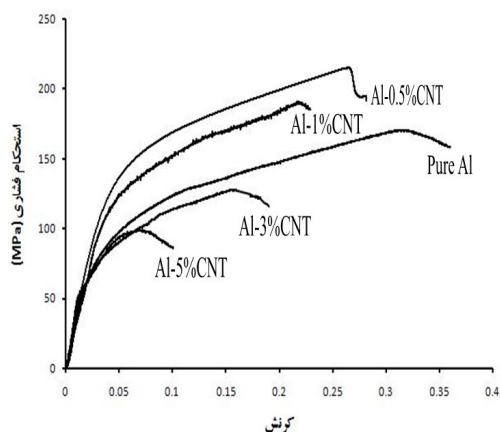
(b)

شکل ۱: تصاویر TEM تهیه شده از نانولوله‌های کربنی اولیه استفاده شده در ساخت کامپوزیت Al-CNTs. (a) قطر نانولوله‌های کربنی و (b) طول نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد.

سپس پودرهای مخلوط شده درون قالب استوانه‌ای شکلی از جنس گرافیت با قطر داخلی ۶ mm ریخته شد تا

### ۳-۱- اثر نانولوله‌های کربنی بر استحکام فشاری

بطور کلی بدلیل استحکام و مدول الاستیک بالای نانولوله‌های کربنی، افزودن آن به سیستم باید موجب افزایش خواص مکانیکی آن گردد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که این هدف در صورتی مهیا می‌شود که چسبندگی و توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی در زمینه فراهم گردد [۲۲]. حضور نانولوله‌های کربنی در تغییر خواص فشاری نمونه‌های کامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی و همچنین برای مقایسه نمونه آلومینیومی خالص نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه آلومینیوم خالص و نمونه‌های کامپوزیتی با درصدهای مختلف نانولوله کربنی را نشان می‌دهد.



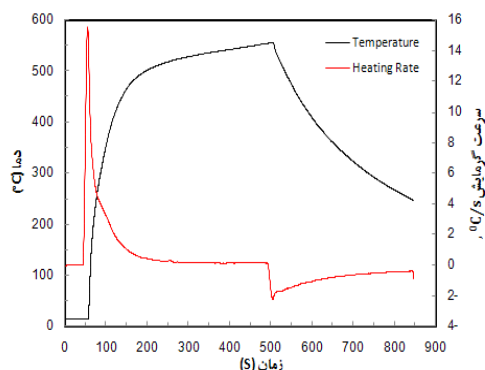
شکل ۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیتی و نمونه آلومینیوم خالص.

همانطور که مشاهده می‌گردد در نمونه‌های حاوی ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی استحکام نسبت به نمونه بدون نانولوله کربنی افزایش یافته است. اما در نمونه‌های کامپوزیتی با مقادیر بیشتر از ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی استحکام کمتری نسبت به نمونه آلومینیومی خالص مشاهده می‌شود. همچنین در نمونه حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی کاهش استحکام نسبت به نمونه با ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان به عدم توزیع یکنواخت و تجمع نانولوله‌های کربنی در اثر افزایش مقدار وزنی آنها در سیستم نسبت داد که در تصاویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی

روی خواص مکانیکی، آزمون فشار تک محوری در دمای اتاق با نرخ کرنش  $0.3 \text{ s}^{-1}$  بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل انجام گرفت. طبق استاندارد نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها ۱/۵ بود. همچنین آزمون سنجش سختی به روش ویکرز توسط دستگاه Bohler با نیروی اعمالی ۱۰۰ g.f در مدت زمان ۱۵ ثانیه بر روی سطوح پرداخت شده در تمام نمونه‌ها انجام گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۳ تغییرات دما و سرعت گرمایش بر حسب زمان در حین تفجوشی پودر آلومینیوم بوسیله SPS را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به محض اعمال جریان الکتریکی، دما به شدت افزایش می‌یابد. ابتدا به علت ایجاد جرقه در فضای بین ذرات پودر آلومینیوم، سرعت گرمایش (شیب نمودار دما-زمان) بسیار زیاد است هنگامیکه این تخلیه الکتریکی و ایجاد جرقه در فضای بین دو ذره صورت می‌گیرد، یک منطقه موضعی با درجه حرارت بسیار بالا به صورت لحظه‌ای تشکیل می‌شود. این موضوع باعث ذوب و یا تبخیر بر روی سطح ذرات و در نتیجه تشکیل گلوبی می‌گردد [۱۸]. پس از آن جریان الکتریکی مستقیم پالسی از ذره‌ای به ذره دیگر، از طریق گلوبی اتصال دهنده آنها جریان می‌یابد. در این مرحله گرمایش زولی بواسطه مقاومت الکتریکی پودر ذکر شده باعث افزایش دما می‌شود که سرعت گرمایش نسبت به حالت قبل (ایجاد جرقه) کمتر شده و بصورت کاهش سرعت گرمایش مشاهده می‌شود.

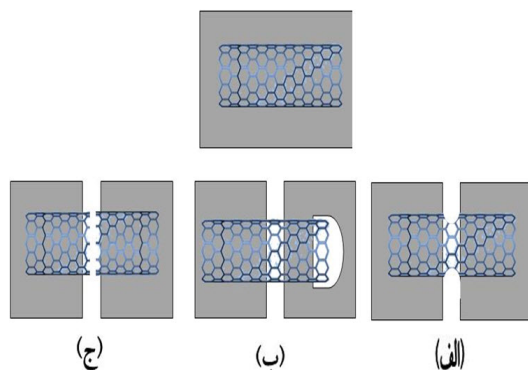


شکل ۳: نمودار تغییرات دما و سرعت گرمایش بر حسب زمان در حین تفجوشی پودر آلومینیوم بوسیله دستگاه SPS.

بود. یکی دیگر از دلایل این اثر، کاهش فاصله میان فاز تقویت کننده با افزایش میزان آنهاست که باعث مشکل شدن حرکت نابجایی می‌شود و تغییر شکل نمونه را مشکل می‌کند [۲۴].

### ۳-۲- نقش نانولوله‌ها در شکست زمینه آلومینیومی

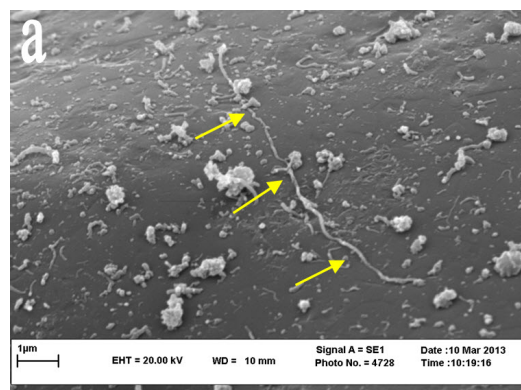
تقویت کننده‌ها با توجه به میزان چسبندگی خود با زمینه می‌توانند در هنگام اعمال تنش رفتار متفاوتی نشان دهند. این پدیده برای نانولوله‌های کربنی که در مسیر رشد ترک قرار می‌گیرند نیز صادق است. شکل ۶ رفتارهای متفاوت نانولوله‌ها را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



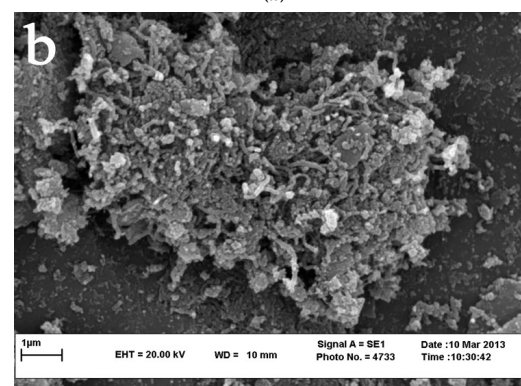
شکل ۶: شماتیکی از رفتار نانولوله‌های کربنی در مقابل تنش، (الف) پل زدن، (ب) کشیده شدن و (ج) شکست.

در صورتی که اتصال فصل مشترک نانولوله با زمینه از چسبندگی کافی برخوردار باشد مکانیزم شکست و یا پل زدن اتفاق می‌افتد. همچنین در برخی از موارد مقاومت زیاد نانولوله در برابر تنش اعمالی منجر به بیرون کشیده شدن نانولوله‌ها از زمینه می‌شود. در مورد نانولوله‌های چند دیواره بدلیل نیروهای ضعیف واندرالس بین لایه‌ها هنگامیکه چسبندگی قوی در فصل مشترک لایه خارجی با زمینه حاکم باشد تنش اعمالی می‌تواند منجر به جدایش لایه‌های نانولوله گردد [۲۵]. بررسی ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها پس از آزمون فشار، مکانیزم‌های ذکر شده را برای نمونه‌های کامپوزیتی نشان می‌دهد. شکل ۷ رفتار بیرون کشیده شدن و شکست نانولوله‌های کربنی از زمینه آلومینیومی را در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی نشان می‌دهد.

رویشی از نمونه‌های پودر کامپوزیتی پس از یک ساعت آسیاکاری در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



(a)



(b)

شکل ۵: تصاویر SEM از توزیع نانولوله‌های کربنی بین ذرات آلومینیوم پس از یک ساعت آسیاکاری در نمونه، (a) Al-1% CNT و (b) Al-5% CNT.

این مناطق تجمع به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل نموده و بر عامل استحکام بخشی غلبه می‌کنند و محل مناسبی برای رشد ترک هستند که شکست زود هنگام نمونه را سبب شده در نتیجه باعث کاهش استحکام این نمونه‌ها شده‌اند. درصد کرنش نیز کاهش چشمگیری در این نمونه‌ها داشته است. این مساله بخاطر شکست زود هنگام نمونه‌ها و عدم شرکت نانولوله‌های کربنی در تغییر شکل است [۲۲]. در تحقیقات مشابه نیز این مشکل مشاهده شده است. بطور مثال Kuzumaki [۲۳]، با افزودن ۳ درصد وزنی نانولوله به سیستم کاهش قابل توجه ۷۵ درصدی در ازدیاد طول نسبت به نمونه خالص را مشاهده کرد که علت آن را عدم توزیع مناسب نانولوله‌ها در زمینه

پودر آلومینیوم باعث ایجاد یک ساختار شبکه‌ای در محل سختی‌سنجی شده و مقدار سختی را در این نمونه‌ها افزایش می‌دهد. ولی با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی باعث بهم چسبیدن و آگلومره شدن آنها شده که در نهایت افت سختی را در این نمونه‌ها بدنبال دارد. در تحقیقات مشابه نیز با افزایش درصد وزنی نانولوله کربنی و آگلومره شدن، کاهش سختی مشاهده شده است [۷].

جدول ۱: مقادیر سختی نانوکامپوزیت‌های تولید شده و درصد تغییرات آنها نسبت به آلومینیوم خالص.

نمونه	سختی (HV)	درصد ازدیاد سختی
خالص Al	۳۱/۵	-
Al-0.5%CNTs	۵۷	۸۰
Al-1%CNTs	۵۱	۶۲
Al-3%CNTs	۲۷/۸	-۱۱/۷
Al-5%CNTs	۲۴/۹	-۲۰/۹

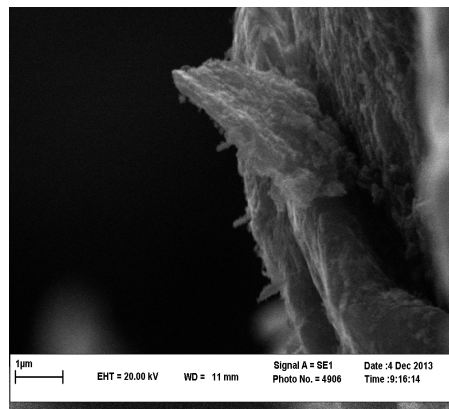
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نانوکامپوزیت Al-CNT با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی به روش SPS تولید شده است و نتایج زیر بدست آمده است:

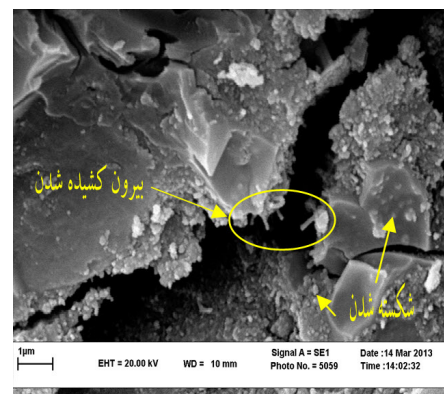
۱- با آسیاکاری مکانیکی می‌توان توزیع همگنی از نانولوله‌های کربنی در زمینه پودر آلومینیوم با درصد‌های وزنی کمتر از یک درصد نانولوله‌های کربنی بدست آورد ولی با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، آگلومره شدن نانولوله‌ها دیده می‌شود.

۲- روش SPS به عنوان یکی از روش‌های نوین تفجوشی پودرهای فلزی، با ایجاد جرقه در بین ذرات پودر آلومینیوم باعث شکسته شدن لایه‌های اکسیدی در سطح این ذرات شده که در نتیجه تفجوشی بهتر و در دمای پایین‌تر صورت گرفته و در نهایت روشی مناسب برای تولید کامپوزیت‌های Al-CNT است.

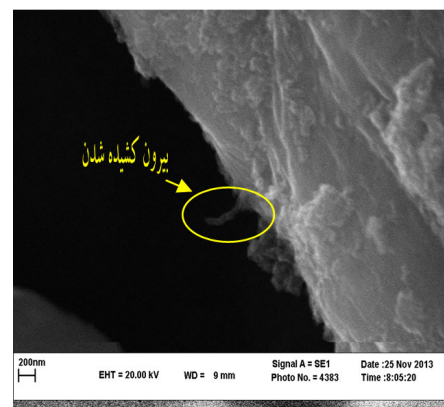
۳- استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان ماده تقویت کننده در زمینه آلومینیوم در مقدار بهینه (حدود ۱ درصد وزنی و کمتر از این مقدار) باعث افزایش سختی تا ۸۰ درصد، استحکام تا حدود ۳۰ درصد شده است و مکانیزم‌های استحکام بخشی نانولوله‌های کربنی در زمینه



(a)



(b)



(c)

شکل ۷: رفتار بیرون کشیده شدن نانولوله‌ها از زمینه آلومینیومی برای نمونه حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله.

#### ۳-۳- آزمون سختی‌سنجی ویکرز

مقادیر سختی ویکرز برای نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده و درصد افزایش آن نسبت به نمونه خالص در جدول ۱ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربنی تا ۱ درصد وزنی و کمتر از آن به ذرات

- [7] C.R. Bradbury, J.K. Gomon, L. Kollo, H. Kwon, M. Leparoux, *Alloys and Compounds*, **585**, 2014, 362.
- [8] T. Peng, I. Chang, *Powder Technology*, **266**, 2014, 7.
- [9] A. Mazahery, H. Abdizadeh, H.R. Baharvandi, *Materials Science and Engineering A*, **518**, 2009, 61.
- [10] H. Kwon, D.H. Park, J.F. Silvain, A. Kawasaki, *Composites Science and Technology*, **70**, 2010, 546.
- [11] T. Laha, A. Agarwal, T. McKechnie, S. Seal, *Materials Science and Engineering A*, **381**, 2004, 249.
- [12] S. Zhou, X. Zhang, Z. Ding, C. Min, G. Xu, W. Zhu, *Composites Part A*, **38**, 2007, 301.
- [13] C.F. Deng, D.Z. Wang, X.X. Zhang, A.B. Li, *Mater. Sci. Eng. A*, **6**, 2007, 138.
- [14] Z.A. Munir, U. Anselmi-Tamburini, M. Ohyanagi, *Materials Science*, **41**, 2006, 763.
- [15] J. Liu, Y. Wang, F. Yang, K. Chen, L. An, *Alloys and Compounds*, **622**, 2015, 596.
- [16] J. Monnier, Y. Champion, L. Perriere, B. Villeroy, C. Godart, *Materials Science and Engineering A*, **621**, 2015, 61.
- [17] M. Tokita, J. Soc, *Powder. Technol.*, **7**, 1993, 790.
- [18] S.X. Song, Z. Wang, G.P. Shi, **39**, 2013, 1393.
- [19] E.A. Olevsky, S. Kandukuri, L. Froyen, *Journal of Applied Physics*, **102**, 2007, 1149.
- [20] H. Kwon, M. Leparoux, A. Kawasaki, *Materials Science and Technology*, **30**, 2014, 736.
- [21] D. Ghahremani, T. Ebadzadeh, A. Maghsodipour, *Ceramics International*, **14**, 2014,
- [22] R. George, K.T. Kashyap, R. Rahul, S. Yamdagni, *Scripta Mater*, **4**, 2005, 1159.
- [23] T. Kuzumaki, K. Miyazawa, H. Ichinose, *Mater. Res.*, **3**, 1998, 2445.
- [24] H. Kurita, M. Estili, H. Kwon, T. Miyazaki, W. Zhou, *Composites: Part A*, **68**, 2015, 133.
- [25] B. Chena, S. Li, H. Imai, J. Umeda, M. Takahashi, K. Kondoh, *Micron*, **69**, 2015, 1.
- [26] C.R. Bradbury, J.K. Gomon, L. Kollo, H. Kwon, M. Leparoux, *Alloys and Compounds*, **585**, 2014, 362.

آلومینیوم مشاهده می‌شود. مقادیر بیشتر از ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به علت آگلومره شدن، افت خواص را به همراه دارند.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد، بخصوص هوشیار صادقیان به جهت انجام مطالعات میکروسکوپی الکترونی روبشی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### مراجع

- [1] S.K. Sajjadi, S.M. Zebarjad, *Powder Metallurgy*, **8**, 2010, 71.
- [2] G. Gorrasi, M. Sarno, A.D. Bartolomeo, D. Sannino, P. Ciambelli, V. Vittoria, *Polymer Science*, **46**, 2006, 597.
- [3] G. Gorrasi, R.D. Lieto, G. Patimo, S.D. Pasquale, A. Sorrentino, *Polymer*, **52**, 2011, 1124.
- [4] M. Raviathul-Basariya, V. Srivastava, N. Mukhopadhyay, *Materials and Design*, **64**, 2014, 542.
- [5] M. Ghalenovi, M. Pourafshari-Chenar, S.A. Mousavi, H. Afshoun, S.R. Ghafarian, "The Effect of MWCNT on the Mechanical and Electrical Properties of HDPE/MWCNT Nanocomposite", 7<sup>th</sup> International Chemical Engineering Congress and Exhibition Kish, Iran, November, 2011.
- [6] J. Liao, M. Tan, I. Sridhar, *Materials and Design*, **31**, 2010, 96.