

# تأثیر گرافن بر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت مس/گرافن

سید حمید دانشمند\*<sup>۱</sup>، محمد ذاکری<sup>۲</sup>، علی محمد بیگی<sup>۱</sup>، علی نظری<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

۲- استادیار، پژوهشکده سرمایه، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

\*daneshmand\_shd@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۰۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۵/۲۵)

## چکیده

در تحقیق حاضر خواص مکانیکی نانو کامپوزیت مس/گرافن تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و پرس سرد مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور عملیات آلیاژسازی مکانیکی پودرهای مس و گرافن به مدت حداکثر ۱۰ ساعت درون آسیاب گلوله‌ای سایشی و تحت اتمسفر گاز آرگون انجام شد. سپس برای بررسی آنالیز فازی از پراش اشعه ایکس و برای ردیابی گرافن از آنالیز رامان و جهت بررسی مورفولوژی پودرها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. با توجه به نتایج، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت مس/گرافن در مقایسه با مس خالص و مس خالص با ۱۰ ساعت آسیاب کاری نشان می‌دهد که سختی نانو کامپوزیت مس/گرافن ۵۶ BHN شده است که در حدود دو برابر مس خالص (۳۵ BHN) می‌باشد و استحکام فشاری این نانو کامپوزیت ۳۴۰ MPa شده است که در مقایسه با مس خالص (۱۰۰ MPa) افزایش سه برابری را نشان می‌دهد.

## واژه‌های کلیدی:

نانو کامپوزیت مس/گرافن، آلیاژسازی مکانیکی، خواص مکانیکی نانو کامپوزیت.

## ۱- مقدمه

الکتریکی با هدایت الکتریکی، گرمایی و استحکام بالا مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از این رو کامپوزیت‌های پایه مس به سبب هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب آنها برای کاربرد در اتصالات الکتریکی مورد توجه قرار گرفت [۲]. گرافن یک ماده جذاب و مورد توجه برای پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است. گرافن ساختار دو بعدی از یک لایه منفرد شبکه لانه زنبوری کربنی می‌باشد که به علت داشتن خواص فوق العاده

مس به عنوان یکی از فلزات مهم مهندسی به صورت خالص و آلیاژی در صنعت از کاربرد بالایی برخوردار است. در شرایط غیر آلیاژی، این فلز ترکیب خارق العاده‌ای از خواص دارد که آن را بصورت ماده‌ای اساسی در صنایع الکتریکی در می‌آورد [۱]. در گذشته اغلب از نقره بعنوان فلز پایه برای اتصالات الکتریکی استفاده می‌شد اما با گسترش صنایع الکتریکی و افزایش قیمت نقره یافتن جایگزین برای نقره در اتصالات

نانو کامپوزیت ها میزان هدایت حرارتی به بیشترین مقدار خود یعنی حدود  $500 \text{ MWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  می رسد در حالی که هدایت حرارتی این نانو کامپوزیت ها با استفاده از گرافن دو لایه حدود نصف میزان گرافن تک لایه می باشد و برای گرافن های بیشتر از سه لایه هدایت حرارتی به  $100 \text{ MWm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  کاهش پیدا می کند [۸]. کامپوزیت های پایه مس تقویت شده با گرافن به سبب هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب و استحکام در دمای بالا، ماده مناسب برای اتصالات الکتریکی می باشد. از گرافن بعنوان فاز تقویت کننده در نانو کامپوزیت های زمینه آلومینیومی استفاده شده است. در این پژوهش استفن بارتولوچی<sup>۳</sup> و همکارانش سه نمونه شامل آلومینیوم خالص، آلومینیوم ۱ درصد نانولوله های کربنی و آلومینیوم ۰/۱ درصد گرافن به روش آلیاژسازی مکانیکی و پرس ایزواستاتیک گرم و اکستروژن تولید کرده اند. نتایج نشان دهنده افت خواص مکانیکی شده نانو کامپوزیت آلومینیوم/گرافن است که دلیل آن را تشکیل کاربید آلومینیوم ناشی از کیفیت پایین گرافن بیان کرده است [۹]. حال در این پژوهش قصد بر تولید نانو کامپوزیت مس/گرافن و مقایسه و بررسی خواص مکانیکی آن با مس خالص می باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از پودرهای مس (Cu) با خلوص ۹۹/۹٪ از شرکت بایر آلمان با اندازه دانه کمتر از ۲۰ میکرون و همچنین پودر گرافن با خلوص ۹۹٪ از شرکت نانو ساختار آویژه (نانو ساو) با تعداد لایه  $n < 20$ ، ضخامت لایه ها  $4 \text{ nm} - 1/5$  و فاصله صفحات  $0.349 \text{ nm}$  استفاده شد. برای تهیه نمونه مس خالص و مس/گرافن به روش آلیاژسازی مکانیکی به ترتیب مراحل زیر انجام گرفت:

در این مرحله پژوهش ابتدا پودرهای مس و گرافن را با نسبت وزنی Cu-0.2G (درصد حجمی گرافن اضافه شده ۲/۳۳ درصد بوده است) همراه با ۲ درصد وزنی اسیداستتاریک بعنوان تنظیم کننده فرآیند با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ با قطر ۱۰ میلیمتر در دستگاه آسیاب گلوله ای سایشی با محفظه آبگرد با

در رسانش الکتریکی ( $2 \times 10^5 \text{ Vs/cm}^2$ ) و رسانش گرمایی ( $5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )، چگالی پایین ( $0.77 \text{ mg/m}^3$ ) و تحرک پذیری حامل های بار و خواص مکانیکی عالی (مدول یانگ  $1100 \text{ GPa}$  و مقاومت بالا در برابر شکست  $125 \text{ GPa}$ ) گرافن را به ماده ای منحصر بفرد تبدیل کرده است. این سامانه جدید حالت جامد به واسطه این خواص فوق العاده به عنوان کاندید بسیار مناسب برای جایگزینی سیلیکون در نسل بعدی قطعه های فوتونیکو الکترونیکی در نظر گرفته شده است و از این رو توجه کم سابقه ای را در تحقیقات بنیادی و کاربردی به خود جلب کرده است [۳-۴]. مدل سازه های مولکولی حاکی از مدول و مقاومت مکانیکی بسیار بالایی لایه های گرافن در گرفتاریت ( $\sigma = 125 \text{ GPa}$ ) و ( $E = 1 \text{ TPa}$ ) است که در نتیجه سبب شده است تا از مواد کربنی به عنوان یک تقویت کننده عالی در کامپوزیت ها کاربرد فراوانی داشته باشد [۵]. برخی از کاربردهای گرافن عبارتند از: استفاده به جای فیبرهای کربن در کامپوزیت ها که باعث ایجاد هواپیماها و ماهواره های سبک تر گردد، استفاده شدن به جای سیلیکون های نیمه رسانا در ترانزیستورها، کاربرد در الکترونیک نوری و ایجاد توربین های بادی کارآمدتر [۶]. امروزه روش های بسیار متنوعی برای ساخت گرافن بکار برده می شود که از متداول ترین آنها می توان به روش های پوسته پوسته کردن میکرومکانیکی، روش رشد همبافته، رسوب بخار شیمیایی و روش های شیمیایی تولید گرافن را نام برد. برخی روش های دیگری همانند شکافتن نانو لوله های کربنی برای تولید نانو نوارهای گرافن و ساخت گرافن با امواج ماکروویو نیز بکار برده شده اند [۷]. در سال های اخیر از گرافن به عنوان فاز تقویت کننده در نانو کامپوزیت های زمینه پلیمری و فلزی استفاده شده است. تحقیقاتی که بر روی نانو کامپوزیت مس/گرافن انجام شده است، نشان می دهد که گرافن باعث افزایش هدایت حرارتی مس شده است. شو وی چنگ<sup>۱</sup> و همکارانش در دانشگاه ماساچوست<sup>۲</sup> بر روی تاثیر گرافن بر هدایت حرارتی نانو کامپوزیت های مس/گرافن و نیکل/گرافن تحقیقاتی انجام داده اند که با استفاده از گرافن تک لایه در این

SEM ساخت شرکت JEOL استفاده شد. همچنین برای ردیابی و همچنین بدست آوردن عیوب گرافن از نسبت  $I_D/I_G$  از دستگاه طیف سنج رامان ساخت شرکت BRUKER استفاده شد. چگالی نمونه های تولید شده با استفاده از ترازوی با دقت  $0.01/0$  گرم به روش ارشمیدس به دست آمد. در ادامه به بررسی استحکام فشاری نمونه ها بر اساس استاندارد  $E9-89a$  [۱۱] با نسبت ارتفاع به قطر  $1/5$  پرداخته شد که قطر نمونه ها در این پژوهش ۱۲ میلیمتر و ارتفاع آنها ۱۸ میلیمتر در نظر گرفته شد و تمام نمونه ها دارای ابعاد و سطح مقطع مساوی تحت بار  $0.15kg$  قرار گرفت. در نهایت برای بررسی سختی نمونه ها از دستگاه سختی سنجی برینل تحت بار  $600 N$  و قطر ساچمه  $2/5$  میلیمتر استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس را برای نمونه آلیاژسازی مکانیکی شده از پودر  $Cu-0.2G$  نشان می دهد. همانطور که در این شکل دیده می شود، پیک های مربوط به مس در نمونه بعد از عملیات آلیاژسازی مکانیکی کاملاً مشخص است. در فرآیند آسیاب کاری، شدت پیک های مربوط به مس کاهش را نشان می دهد، که نشانگر انجام فرآیند آلیاژسازی در حالت جامد است. با توجه به اینکه از درصد کمی از گرافن در این نانو کامپوزیت استفاده شده است دستگاه قادر به تشخیص گرافن موجود در نمونه ها نبود و تنها پیک های مس در این نتایج مشاهده می شود. اما با توجه به ایجاد محلول جامد در نمونه ها در حین آلیاژسازی مکانیکی، مقدار جابجایی در پیک های اصلی مس به دلیل افزایش زمان آسیاب کاری و همچنین تفاوت قطر اتمی مس و گرافن و تغییر یافتن پارامتر شبکه مس به علت حضور گرافن در شبکه آن، مشاهده می شود.

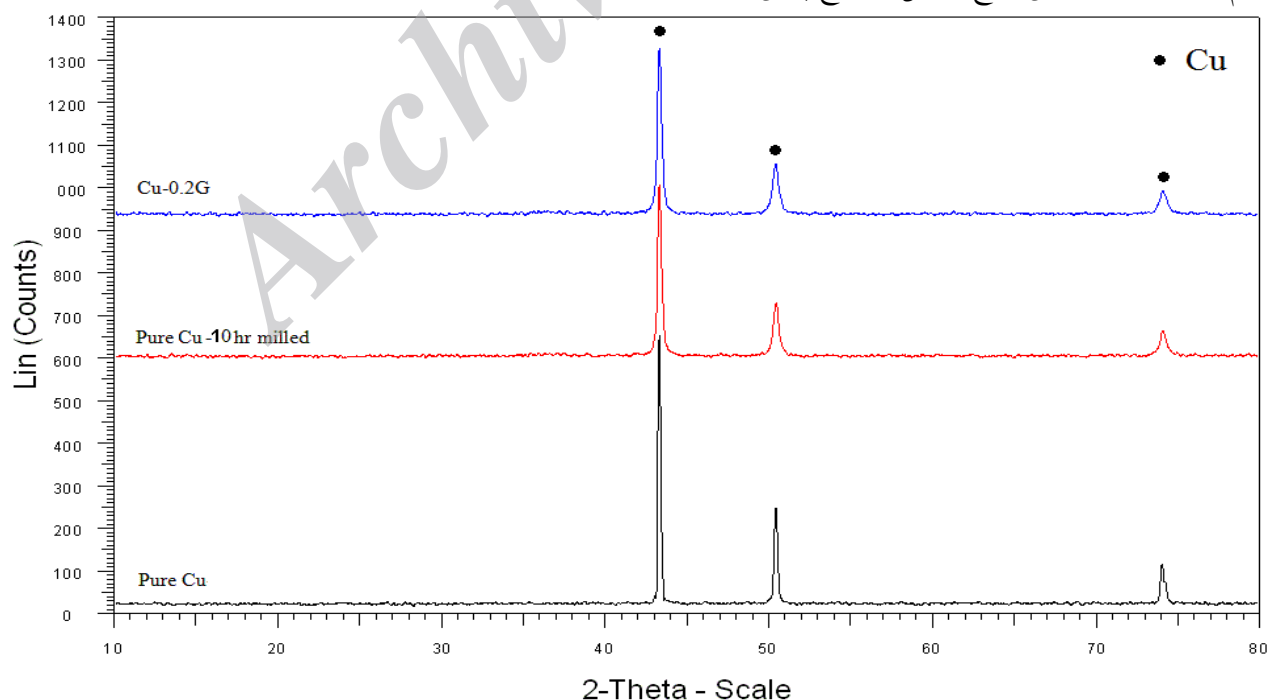
از آنجا که جابجا شدن پیک ها به سمت چپ و در واقع کاهش زاویه پراش متناسب با پیک های اصلی مس خالص با توجه به رابطه براگ  $(n\lambda = 2d\sin\theta)$  [۱۲]، بیان کننده افزایش پارامتر شبکه است. با توجه به رابطه مستقیم فاصله بین صفحات

سرعت چرخش  $250$  دور بر دقیقه و تحت محیط گاز آرگون بطور مکانیکی آسیاب کاری شدند و آلیاژ مس/گرافن بدست آمد. جنس محفظه و گلوله های مورد استفاده از فولاد زنگ نزن بود. عملیات آسیاب کاری تا حداکثر ۱۰ ساعت ادامه یافت و در پایان هر ۲ ساعت دستگاه خاموش شد، فرآیند آسیاب کاری پس از گذشت ۱ ساعت ادامه یافت تا در این مدت دمای پودرها کاهش یافته و از گرم شدن بیش از حد ذرات پودر جلوگیری شود، همچنین دو نمونه بعنوان مرجع در نظر گرفته شد، مس خالص با اندازه دانه کمتر از  $20$  میکرون و مس خالص با  $10$  ساعت آسیاب کاری تا تاثیر زمان آسیاب کاری نیز محاسبه شود. برای پرس از یک قالب فولادی گرم کار که تحت آبکاری و سخت کاری سطحی قرار گرفته است به قطر داخلی  $12$  میلیمتر استفاده شد. در این مرحله به منظور جلوگیری از اکسید شدن ذرات پودر، پودرها تحت فشار  $30 MPa$  و دمای  $500^\circ C$  قرار گرفت. احتمالاً با توجه به دمای  $500^\circ C$  اثر کار سرد حاصل از آسیاب کاری مکانیکی حذف می شود. به همین ترتیب نیز ماده روان ساز نیز خارج و انسجام اولیه حاصل می شود. به منظور بالا بردن چگالی نمونه ها و کاهش تخلخل، نمونه ها در همین مرحله، تحت فشار  $400$  مگاپاسکال پرس شدند. سپس برای تف جوشی، نمونه ها را در محفظه ای حاوی گرافیت قرار داده و درب آنرا بسته و در داخل کوره عملیات حرارتی ساخت شرکت اکسایتون قرار داده تا نمونه ها در دمای  $700^\circ C$  تف جوشی شوند، افزایش دما با نرخ  $10^\circ C/min$  انتخاب شد همچنین زمان تف جوشی همدم برابر یک ساعت بود، در نهایت نمونه ها در کوره سرد شدند. برای بررسی تشکیل فازها از دستگاه XRD ساخت شرکت BrukerAXS با پرتو با طول موج  $1/5404$  آنگستروم  $Cu K\alpha$  و فیلتر نیکل استفاده شد. همچنین آنالیزها توسط دستگاه با اشعه  $Cu K\alpha$  با طول موج  $1/5404$  آنگستروم انجام شد. در این آزمایش زوایای مورد بررسی از  $10 - 80$  درجه می باشد. محاسبه اندازه کریستالیت ها از طریق رابطه Williamson-Hall [۱۰] و بر مبنای پهنایش الگوهای XRD انجام شد. برای بررسی مورفولوژی پودرها از دستگاه

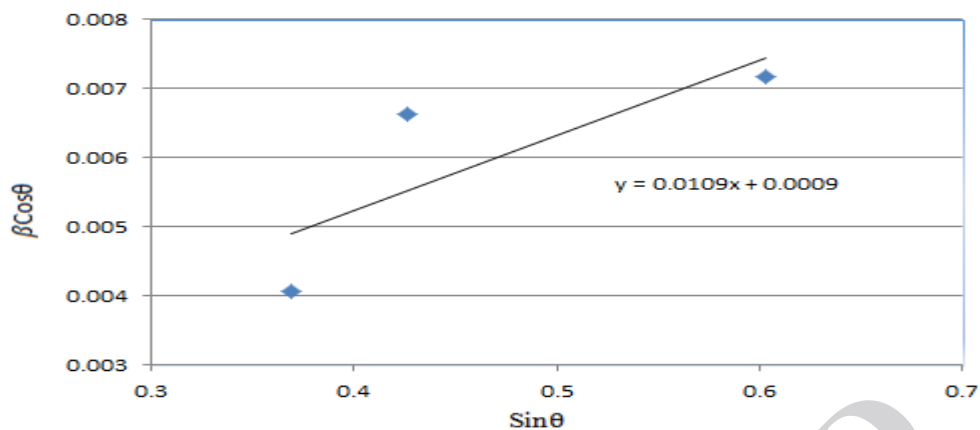
نمونه پودری Cu-0.2G پس از ۱۰ ساعت آسیاب کاری با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱، کرنش شبکه ۰/۰۰۵۴۵ و اندازه دانه ۱۵۴ نانومتر می باشد.

شکل (۳) آنالیز رامان را برای نمونه پودری مس ۰/۲ درصد گرافن را نشان می دهد. از این آنالیز جهت ردیابی گرافن در نانو کامپوزیت مس-گرافن استفاده گردید. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود دو پیک بدست آمده است که نشان دهنده وجود گرافن در نانو کامپوزیت Cu-0.2G می باشد. در این آنالیز از چند نقطه مختلف نمونه طیف گیری انجام شده که در نقاط مختلف آن طیف های مشابهی مشاهده شده است که از هر کدام یکی به شرح ذیل گزارش شده است. طول موج های بدست آمده در آنالیز رامان بترتیب: باند D در محدوده  $\text{Cm}^{-1}$  ۱۶۰۱/۰۰ مشاهده می شود. بر این اساس نسبت  $I_D/I_G$  گرافن خالص قبل از آسیاب کاری مکانیکی (۱.۴۷) و نسبت  $I_D/I_G$  گرافن بعد از آسیاب کاری مکانیکی (۱.۸۸) است که افزایش قابل ملاحظه ای را نشان داده و نشانی از تخریب در ساختار گرافن را نشان نمی دهد.

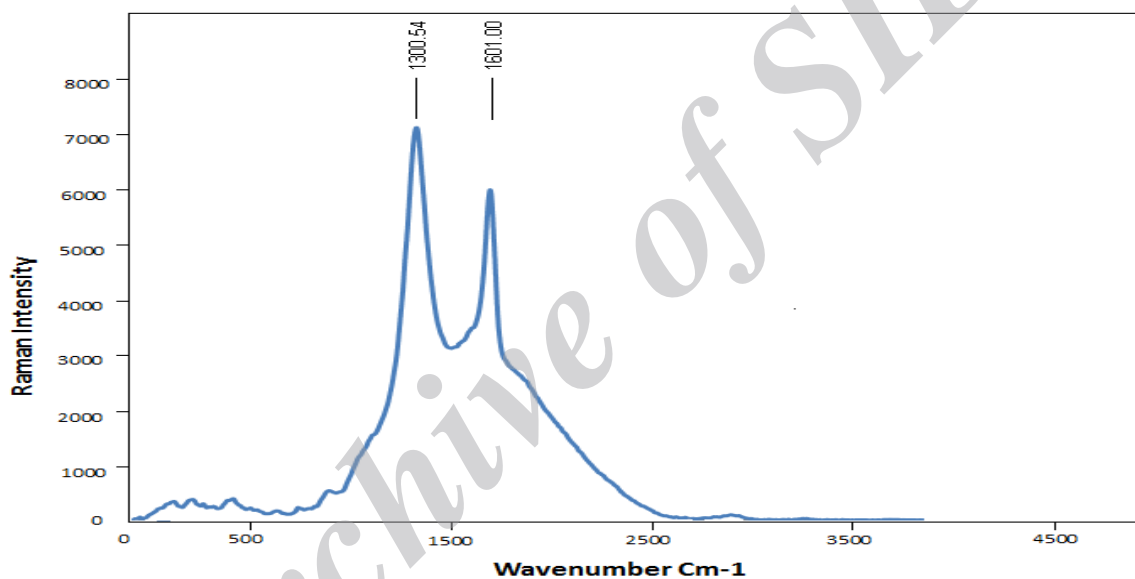
کریستالی و پارامتر شبکه، افزایش پارامتر شبکه مس نتیجه می شود. در واقع افزایش پارامتر شبکه مس بیانگر آلیاژ شدن مس و گرافن می باشد. از سوی دیگر حضور احتمالی ذرات آهن در حین برخورد ذرات پودر به گلوله و محفظه آسیاب در شبکه مس وارد شدند مقداری بر جابجایی پیک ها تاثیر می گذارد. از آنجا که قطر اتمی آهن ۲/۵۲ Å بوده و از مس کوچکتر است و در صورت قرار گرفتن اتم آهن در شبکه مس، فاصله بین صفحات کریستالی مس و پارامتر شبکه آن کاهش پیدا می کند و با توجه به رابطه براگ زاویه پراش متناسب با پیک های اصلی مس خالص افزایش می یابد. بنابراین تاثیر این دو پارامتر بر روی جابجایی پیک ها، باعث می شود که کاهش زاویه پراش به علت حضور اتم های گرافن در شبکه مس چندان محسوس نباشد. با توجه به روابط مختلف موجود برای تخمین اندازه دانه و کرنش شبکه در این پژوهش از رابطه ویلیام سون هال استفاده شده است. در این پژوهش پس از رسم منحنی  $\beta \cos \theta - \sin \theta$  شکل (۲)، معادله بهترین تقریب خطی آن بدست می آید [۱۳]. آنالیزها توسط دستگاه با اشعه  $\text{CuK}\alpha$  با طول موج ۱/۵۴۰۴ آنگستروم انجام شده است. بر اساس نتایج حاصل از طرح پراش اشعه X



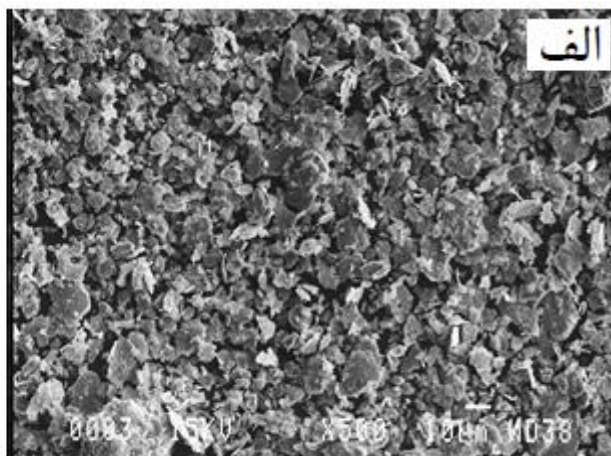
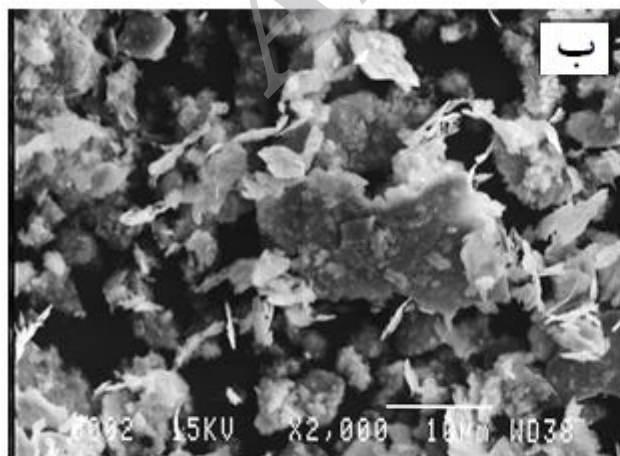
شکل (۱): الگوی پراش اشعه X برای پودر Cu-0.2G در زمان ۱۰ آسیاب کاری



شکل (۲): منحنی  $\beta\text{Cos}\theta$  برحسب  $\text{Sin}\theta$  نمونه Cu-0.2G پس از ۱۰ ساعت آسیاب کاری



شکل (۳): آنالیز رامان (Raman) برای ردیابی صفحات گرافن در نانو کامپوزیت Cu-0.2G آسیاب کاری



شکل (۴): مورفولوژی ذرات پودر ۰/۲ درصد گرافن

ارائه شده است. ضمناً برای محاسبه درصد تخلخل نیاز به داشتن چگالی تئوری نمونه ها است که البته با توجه به مقادیر کم گرافن (۰/۲ درصد وزنی) از محاسبه چگالی تئوری نمونه ها صرف نظر شده و همان چگالی مس خالص در نظر گرفته شده است. از نتایج حاصل از نمونه ها بر می آید که نمونه ها بعد از عملیات زینتر از درصد تخلخل نسبتاً بالایی برخوردار هستند که می تواند ناشی از حضور اکسیژن در محیط زینتر باشد. البته در صورت به کارگیری روشهایی چون پرس داغ در فرآیند تولید، میزان تخلخل کاهش بیشتری پیدامیکند.

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر مس ۰/۲ درصد گرافنپس از ۱۰ ساعت آسیابکاری با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ را نشان میدهد. در مجموع پس از آسیاب به مدت ۱۰ ساعت با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ منجر به ایجاد کار سختی در ذرات و شکسته شدن آنها شده است و متوسط اندازه ذرات کاهش یافته است. در این مرحله با کاهش اندازه ذرات و فاصله بین لایه‌ای ذرات، نفوذ اتم ها در فصل مشترک لایه های ایجاد شده منجر به تشکیل آلیاژم می شود. افزایش عیوب داخلی و بالارفتن دما باعث تسریع نفوذ اتم ها م می شود [۱۴]. چگالی و درصد تخلخل نمونه ها قبل و بعد از زینتر بر طبق رابطه ارشمیدس بدست آمده است. نتایج محاسبات در جدول (۱)

جدول (۱): چگالی و درصد تخلخل نمونه ها

شماره نمونه	چگالی خام ( $gr/Cm^3$ )	چگالی عملی ( $gr/Cm^3$ )	چگالی تئوری ( $gr/Cm^3$ )	چگالی نسبی (%)	درصد تخلخل (%)
مس خالص میکرو	۷/۷۲۷	۷/۱۳	۸/۹	۸۰/۱۱	۱۹/۸۸
مس خالص ۱۰ ساعت آسیاب کاری شده	۷/۴۶۹	۶/۸۳	۸/۹	۷۶/۷۴	۲۳/۲۵
Cu-0.2G	۷/۹۱۹	۶/۳۲	۸/۹	۷۱/۰۱	۲۸/۹۸

افزایش سختی میتواند حضور ذرات تقویت کننده در داخل ساختار می باشد که توزیع مناسب و یکنواخت این ذرات در داخل ساختار باعث میشود نابجایی هایی که در اثر تنش وارد شده به حرکت کرده اند پس از برخورد به این ذرات متوقف شده که برای عبور از این ذرات به تنش های بالاتری نیاز دارند. و همچنین تاثیر زمان آسیاب کاری را می توان در سختی بالاتر نمونه مس خالص ۱۰ ساعت آسیاب کاری شده در مقایسه با نمونه مس خالص میکرو مشاهده نمود.

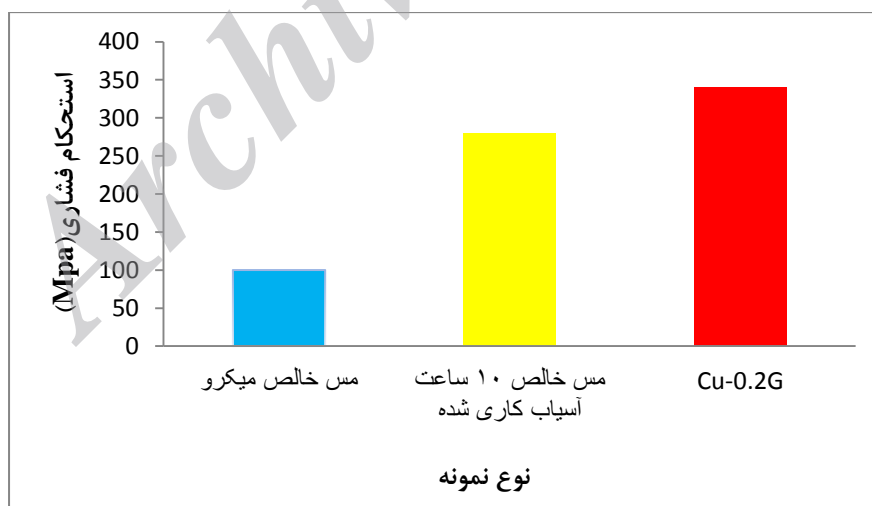
سختی نمونه ها در قبل و بعد از زینتر مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در جدول (۲) آمده است. همانطور که در جدول (۲) آمده است نمونه ها قبل از زینتر از سختی بالاتری نسبت به نمونه های زینتر شده برخوردار هستند که این بالاتر بودن اعداد سختی بدست آمده می تواند ناشی از کار سختی بوجود آمده پودرها در حین آلیاژسازی مکانیکی باشد. همانطور که از نتایج بر می آید نمونه Cu-0.2G از سختی بالاتری نسبت به دو نمونه برخوردار می باشد که به خوبی تاثیر گرافن بر روی نانو کامپوزیت مس / گرافن را نشان می دهد که دلیل این

جدول (۲): سختی نمونه ها قبل و بعد از زینتر

نوع نمونه	وضعیت تولید	سختی (BHN)
مس خالص میکرو	قبل از زینتر	۶۰
مس خالص میکرو	بعد از زینتر	۳۵
مس خالص ۱۰ ساعت آسیاب کاری شده	قبل از زینتر	۶۵
مس خالص ۱۰ ساعت آسیاب کاری شده	بعد از زینتر	۳۹
Cu-0.2G	قبل از زینتر	۸۳
Cu-0.2G	بعد از زینتر	۵۶

کرد. همچنین نتایج نشان می دهد که تنها با افزودن ۰/۲ درصد گرافن به مس و ۱۰ ساعت آسیاب کاری استحکام افزایش قابل توجهی در حدود ۳۴۰ Mp پیدا کرد. یکی از دلایل افزایش استحکام در نانو کامپوزیت ها حضور فاز تقویت کننده در زمینه می باشد که در یک سیستم کامپوزیت فلزی انتقال نیرو از زمینه به فاز تقویت کننده و نیز افزایش دانسیته نابعایی ها موجب افزایش استحکام فلز زمینه می شود [۱۵]. نتایج بدست آمده از استحکام فشاری در شکل (۵) آمده است.

با بررسی نتایج مشخص شد که افزودن ۰/۲ درصد گرافن به مس به عنوان فاز تقویت کننده باعث بهبود خواص مکانیکی نانو کامپوزیت مس-گرافن شد. استحکام فشاری مس خالص میکرو ۱۰۰ Mpa شد و استحکام فشاری مس خالص ۱۰ ساعت آسیاب کاری شده ۲۸۰ Mpa شد که این افزایش استحکام نسبت به مس خالص میکرو ناشی از زمان آسیاب کاری و افزایش تعداد نابعایی ها می باشد همچنین نتایج نشان می دهد که تنها با افزودن ۰/۲ درصد گرافن به مس و ۱۰ ساعت آسیاب کاری استحکام افزایش قابل توجهی در حدود ۳۴۰ Mp پیدا



شکل (۵): استحکام فشاری نمونه ها

اکسیداسیون، اطمینان از خلوص بالای پودرها ضروری است و به همین علت از گرافن با خلوص بالا استفاده شده است، چرا

#### ۴- نتیجه گیری

امکان سنتز نانو کامپوزیت مس/گرافن از طریق فرآیند آلیاژسازی مکانیکی وجود دارد. اما با توجه به حساس بودن گرافن به

[5] J. Robert, I. young, A. Kinloch, L. Gong, K. S. Novoselov, "The mechanics of graphenenano composites", A review, 2010.

[۶] ت. اسکویی، روند تحقیقات در زمینه گرافن - ماهنامه فناوری نانو - شماره ۱۲، پیاپی ۱۴۹-سال هشتم اسفند، ۱۳۸۸.

[۷] معظمی و گودرزی، بررسی عوامل موثر بر پایدار سازی نانو صفحات گرافن در سامانه های پلیمری- دانشگاه امیرکبیر- ۱۳۸۹.

[8] Sh. W. Chang, A. K. N. Markus & J. Buehler "Geometry and temperature effects of the interfacial thermal conductance in copper- and nickel-graphenenanocomposites", 2012.

[9] S. F. Bartolucci, J. Paras, M. A. Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor & N. Koratkar, "Graphene-aluminum nanocomposites", 2011.

[10] G. K. Williamson & W. H. Hall, "X-Ray line broadening from filed Aluminium and wolfram", Acta Metallurgica, Vol. 1, 1953.

[11] William E. Luecke, S. M. Graham & M. A. Adler "Repeatability and reproducibility of compression strength measurements conducted according to ASTM E9", 2010.

[12] B. D. Cullity, "Elements of X-ray diffraction addision" reading, 1978.

[13] V. Rajkovic, D. Bozic & M. T. Jovanvic, "Properties of Copper Matrix Reinforced with Nano- and Micro-Sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles", Journal of Alloy and Compounds, Vol. 495, pp. 177-184, 2008.

[14] C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying and Milling", Progress in Materials Science, Vol. 46, 2001.

[15] ASM HandBook, "Composites", ASM Internationals Material Park, Ohio, vol. 21, pp. 51-55, 1190.

## ۷- پی نوشت

- [1] Shu-Wei Chang  
[2] Massachusetts  
[3] Stephen F. Bartolucci

که حضور این ناخالصی ها باتشکیل ترکیبات اکسیدی در ذرات پودر در حین فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، با ایجاد یک لایه اکسیدی بر روی ذرات پودر شده و از نفوذ اتمی و تف جوشی مناسب پودرها جلوگیری می کند. فرآیند آلیاژسازی مکانیکی باعث ریز شدن اندازه کریستالیت ها در ساختار پودر شده است.

در این پژوهش زمان مناسب برای آلیاژسازی ۱۰ ساعت و نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ در نظر گرفته شده است. پس از بررسی خواص مکانیکی نتایج زیر بدست آمده است :

۱- افزایش استحکام فشاری نانوکامپوزیت مس/گرافن با افزودن ۰/۲ درصد گرافن به میزان ۳۴۰ مگاپاسکال.

۲- افزایش سختی نانوکامپوزیت مس/گرافن با افزودن ۰/۲ درصد گرافن به میزان ۵۶ برینل.

## ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند که از ستاد توسعه ویژه فناوری نانو و سازمان بسیج علمی، پژوهشی و فناوری (مرکز حمایت از مبتکرین و مخترعین و محققین بسیجی)، تشکر نمایند. در انتها نیز نویسندگان مقاله از جناب آقای دکتر عبدالمجید خادم که نویسندگان را در انجام این پژوهش یاری نموده اند، نهایت تشکر و سپاس گذاری را می نمایند.

## ۶- مراجع

- [1] W. F. Smith & M. Hill, "Structure and Properties of Engineering Material", 1987.  
[2] V. Rajkovic, D. Bozic & M. T. Jovanovic, Material and Design, Vol. 31, pp. 2010.  
[3] A. K. Geim & K. S. Novoselov, "The rise of grapheme", Nature Materials, 2007.  
[4] Scientific background on the Nobel Prize in physics GRAPHENE- Compiled by the class for Physics of the Royal Swedish Academy of sciences, 2010.