

# بررسی خواص فوم نانو کامپوزیتی مس / آلومینا تولید شده به روش متالورژی پودر

مینا سبزواری\*<sup>۱</sup>، سید عبدالکریم سجادی<sup>۲</sup>، احمد مولودی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- مربی پژوهشی، گروه پژوهشی مواد، جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ایران

\*Mina.sabzevari@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۱۸، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۵/۱۵)

## چکیده

در این تحقیق فوم نانو کامپوزیتی زمینه مسی تقویت شده با نانو ذرات آلومینا ( $Al_2O_3$ )، با استفاده از عامل فوم ساز کربنات پتاسیم ( $K_2CO_3$ ) و با به کارگیری روش فوم سازی پودر فشرده تولید شد. پیش ماده که شامل پودر مس و نانو ذرات آلومینا بود به مدت ۴ ساعت آسیا کاری مکانیکی شد و سپس با درصدهای متفاوتی از کربنات پتاسیم مخلوط و با استفاده از پرس سرد تهیه گردید. پیش ماده فشرده شده سپس در دمای تفجوشی ۸۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۸۰ دقیقه و پس از آن در دمای فوم سازی ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفت. در ادامه به منظور بررسی تنش پایا و کرنش چگالش، فوم های نانو کامپوزیتی تولیدی با درصدهای تخلخل و چگالی های نسبی متفاوت، تحت آزمون فشار قرار گرفتند. همچنین آنالیز حرارتی DTA از پودر کربنات پتاسیم و آنالیز EDS از پودر نانو کامپوزیتی مس / آلومینا و تصویربرداری با میکروسکوپ SEM از نمونه ها انجام شد. به منظور بررسی فازهای احتمالی تولیدی حین فرایند تولید، از آنالیز XRD استفاده شد. نتایج مطالعات میکروسکوپی از مورفولوژی حفرات نشان داد فوم های تولیدی دارای توزیع و نفوذ سطحی مناسبی از نانو ذرات آلومینا در زمینه مسی هستند و ساختار حفرات نسبتا همگن و یکنواخت است. در نتایج آنالیز XRD اثری از فاز جدید مشاهده نشد. همچنین با افزایش چگالی نسبی از ۰/۳۵۸ به ۰/۷۹۵، تنش پایای نمونه های تولید شده و قابلیت جذب انرژی به ترتیب از ۱۸ به ۱۱۲/۵ مگا پاسکال و از ۲۰ به ۳۰ مگاژول بر متر مکعب افزایش یافت.

## واژگان کلیدی:

فوم نانو کامپوزیتی مس / آلومینا، روش فوم سازی پودر فشرده، کربنات پتاسیم.

## ۱- مقدمه

حرارتی و صوتی شده است. این مواد زیرمجموعه ای از مواد پیشرفته هستند و روش های تولید آن ها بسیار متنوع است [۱-۳]. در این میان یکی از روش های پرکاربرد در ساخت فوم های فلزی روش متالورژی پودر است که بر مبنای استفاده از پودر

در سال های اخیر توجه ویژه ای به فوم های فلزی به عنوان یک ساختار سبک با تخلخل بالا و کنترل شده که خواص بی نظیری از جمله قابلیت جذب انرژی بالا را از خود نشان می دهند در صنایع مختلف نظیر خودروسازی، هوافضا، صنایع نظامی، صنایع

می شود. از این رو هدف اصلی از به کار بردن نانو ذرات به عنوان فاز تقویت کننده، استحکام بخشی زمینه فلزی همزمان با حفظ انعطاف پذیری است. به این پیش ماده، نانو کامپوزیت زمینه فلزی<sup>۳</sup> (MMNC) گفته می شود [۱۶-۱۷].

در تحقیق حاضر از روش آسیاکاری مکانیکی برای نفوذ سطحی و پراکندگی یکنواخت نانو ذرات در زمینه فلزی استفاده شد که روشی مناسب برای پخش یکنواخت نانو ذرات و تولید کامپوزیت های زمینه فلزی است [۱۸-۱۹]. سپس از آن مخلوط پودری برای ساخت فوم نانو کامپوزیتی مس-آلومینا استفاده شد. تاکنون تحقیق جامعی در جهت تولید فوم های نانو کامپوزیتی تقویت شده با نانو ذرات بر مبنای روش های متالورژی پودر صورت نگرفته است. از این رو هدف از انجام این تحقیق تولید فوم نانو کامپوزیتی با استفاده از نانو ذرات آلومینا با استفاده از روش متالورژی پودر و مقایسه و بررسی ویژگی این نوع از فوم ها است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

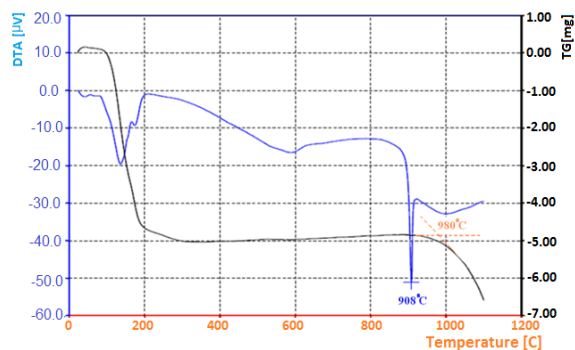
پودر مس با میانگین اندازه ذرات ۱۰۰ میکرومتر و نانو ذرات آلومینا با میانگین اندازه ذرات ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر پس از ۴ ساعت آسیاکاری مکانیکی در محیط گاز آرگون با نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ و سرعت ۳۰۰ RPM، به عنوان مواد اولیه نانو کامپوزیتی انتخاب شدند. مشخصات این پودرها و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی آن ها در شکل ۱ نشان داده شده است. برای انتخاب یک تقویت کننده مناسب برای نانو کامپوزیت تقویت شده با نانو ذرات فاکتورهایی از قبیل واکنش پذیری شیمیایی تا دماهای بالا بایستی در نظر گرفته شوند [۱۳]. بر این اساس آلومینا به دلیل قابلیت استحکام مطلوب تا دماهای بالا به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شد. تصویر SEM و آنالیز EDS این پودر (شکل ۲) پس از آسیاکاری نیز حاکی از عدم تشکیل فاز میانی طی فرایند و پراکندگی مطلوب نانو ذرات در زمینه مس بود. این نتایج نشان دهنده کافی بودن انرژی و مدت زمان آسیاکاری است.

فلزات بوده و قابلیت کنترل اندازه، شکل و پراکندگی حفرات را دارد [۴]. از دیگر مزایای این روش می توان به قابلیت تولید فوم های کامپوزیتی و یا آلیاژی، انعطاف در انتخاب فلز، نزدیک بودن به شکل نهایی و عدم نیاز به افزودن ذرات پایدار کننده اشاره نمود [۵]. در این روش ابتدا پودر فلزی با پودر عامل فوم ساز مخلوط شده و سپس این مخلوط تحت پرس فشرده می شود. نام این محصول میانی را می توان فشردان پودری<sup>۱</sup> گذاشت [۶]. در نهایت در عملیات حرارتی تفجوشی، نمونه به استحکام مورد نظر می رسد. در بعضی موارد، عامل فوم ساز حین عملیات تفجوشی تجزیه شده و خارج می شود [۷].

فوم مس به دلیل داشتن انتقال حرارت بسیار عالی تا دماهای بالا و نقطه ذوب بالا، یکی از پر کاربردترین نوع فوم های فلزی در زمینه انتقال حرارت است. به طور مثال برای ساخت مبردهای حرارتی در آینه های لیزری از این فوم استفاده می شود. ناکاجیما و همکارانش در سال ۲۰۰۱ میلادی فوم مسی را با استفاده از تشکیل حباب هیدروژن هنگام انجماد مذاب تولید و خواص آن را بررسی کردند [۸]. اخیراً ژانگ و وانگ تحقیقات گسترده ای را بر روی خواص فوم های مس انجام داده اند و روش حذف کرنات تفجوشی شده<sup>۲</sup> (LCS) را برای تولید فوم مسی با استفاده از عامل فوم ساز کرنات پتاسیم ( $K_2CO_3$ ) توسعه داده اند [۹-۱۱]. اندازه سلول فوم ها در این روش در محدوده ۵۰۰۰-۱۰۰ میکرومتر قرار دارد [۱۲].

از طرف دیگر به علت عدم استحکام در دمای بالا و مقاومت به سایش پایین مس خالص، معمولاً از کامپوزیت های زمینه مسی با ذرات تقویت کننده اکسیدی استفاده می شود [۱۳]. یکی از پر کاربردترین نوع این کامپوزیت ها، کامپوزیت مس-آلومینا است. این نوع کامپوزیت خاصیت هدایت الکتریکی و حرارتی مطلوب مس و استحکام بالای آلومینا را به صورت همزمان دارا است. این نوع کامپوزیت در تولید الکترودهای جوش مقاومتی و راکتورهای آزمایشگاهی هسته ای پیشنهاد و استفاده شده است [۱۴-۱۵]. معمولاً اضافه کردن ذرات سرامیکی به منظور تقویت استحکام ماده، منجر به کاهش نسبتاً شدید انعطاف پذیری

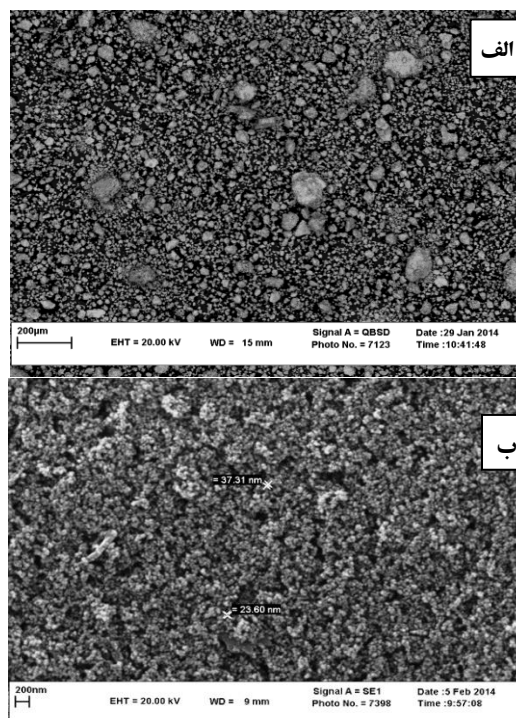
آسیاکاری مکانیکی، نمونه‌ها تحت فشار ۲۵۰ مگاپاسکال پرس و در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۸۰ دقیقه در محفظه بسته حاوی زغال (به دلیل ایجاد محیط احیایی و جلوگیری از اکسیداسیون مس) تفجوشی شدند. در نهایت سطح مقطع آنها با آزمون ریزسختی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از پودر کربنات پتاسیم ( $K_2CO_3$ ) با میانگین اندازه ذرات ۵۰۰ میکرومتر به عنوان عامل فوم ساز استفاده شد. به منظور تعیین محدوده دمایی شروع و پایان تجزیه کربنات کلسیم از آزمون DTA تحت اتمسفر هوا و با نرخ گرمایش  $10^\circ C/min$  استفاده گردید که منحنی مربوط به آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



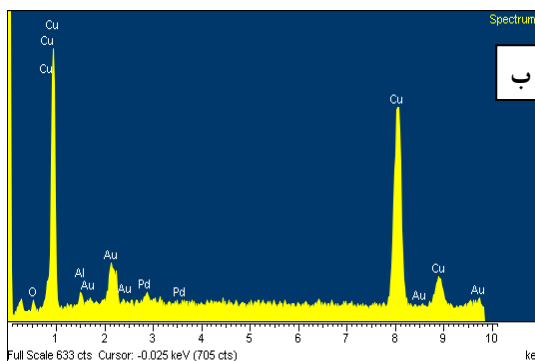
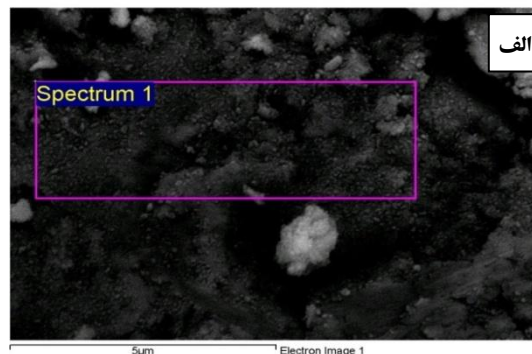
شکل (۳): نتیجه آنالیز حرارتی TGA و DTA پودر کربنات پتاسیم مورد استفاده به عنوان عامل فوم ساز

همانطور که در این نمودار مشخص است، دمای ذوب کربنات پتاسیم حدود ۹۰۸ درجه سانتیگراد است و از دمای حدود ۹۸۰ درجه سانتیگراد تجزیه آغاز می شود. بنابراین طبق این نتایج به منظور خروج کامل و راحت تر عامل فوم ساز، دمای فوم سازی باید بالاتر از این دما انتخاب شود.

برای تولید محصول فومی، ابتدا پودر کامپوزیتی مس-آلومینا و کربنات پتاسیم با نسبت های ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی مخلوط شده و سپس تحت پرس سرد به وسیله سنبه - ماتریس فولادی با قطر ۲۰ میلی متر تحت فشار ۲۵۰ مگاپاسکال قرار گرفتند. پیش ماده به دست آمده در یک لوله فولادی قرار داده شد و دو طرف لوله با مقادیر زغال پوشیده و کاملاً بسته شد. پس از آن پیش ماده های فوق در دمای تفجوشی ۸۵۰ درجه



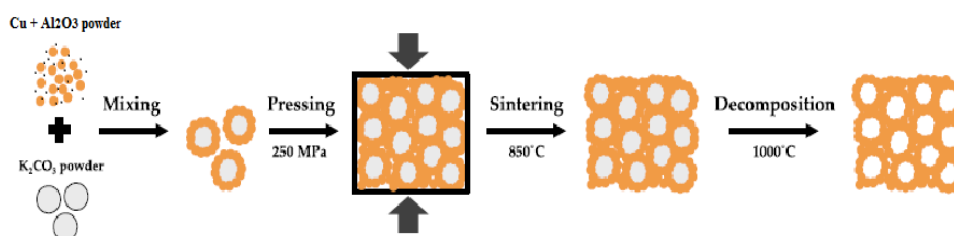
شکل (۱): تصاویر SEM پودر های: (الف): مس، (ب): نانو ذرات آلومینا



شکل (۲): (الف): تصویر SEM و (ب): نتیجه آنالیز EDS پودر کامپوزیتی مس - آلومینا

برای تعیین درصد وزنی مناسب افزودن نانو ذرات آلومینا به پودر مس، ۴ درصد متفاوت ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ انتخاب گردید. پس از

معمولی نیز با شرایط تولید یکسان با نمونه فوم نانوکامپوزیت مس - ۲٪ آلومینا با درصد تخلخل (۵۰٪) تولید گردید. در جدول ۱ شرایط مختلف تولید نمونه‌های مورد بررسی آورده شده است.



شکل (۴): شماتیک روش متالورژی پودر مورد استفاده برای تولید فوم نانوکامپوزیتی مس - آلومینا

ساتیگراد به مدت ۱۸۰ دقیقه و سپس در دمای فوم سازی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. در انتها فوم تولیدشده از کوره خارج و در اتمسفر هوا خنک شد. شکل ۴ شماتیک روش تولید را نشان می‌دهد. همچنین در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر افزودن نانو ذرات، یک نمونه فوم مسی

توجه به استاندارد DIN 50134 آلمان، در کرنش مطابق با ۱/۳ برابر تنش پایا محاسبه گردید. همچنین مقدار جذب انرژی برای نمونه‌های فوم مسی نانوکامپوزیتی تولیدشده با محاسبه سطح زیر منحنی تنش - کرنش طبق استاندارد ژاپنی (JIS H 7902) و معادله نشان داده شده در رابطه (۱) به صورت انرژی بر واحد حجم محاسبه شد [۲۰].

$$Pa = \frac{N}{m^2} \xrightarrow{\text{Multiplied by a unit volume}} \frac{N}{m^2} \times \frac{m^3}{m^3} = \frac{N \times m}{m^3} = \frac{Joule}{m^3} \quad (1)$$

از آنجایی که اعداد بدست آمده از حاصلضرب تنش در کرنش از لحاظ دیمانسیون واحد پاسکال داشته، باید در واحد حجم ضرب شود تا بتوان مواد مختلف را از طریق نرمال کردن با واحد ژول با هم مقایسه کرد. بنابراین طبق رابطه بالا واحد آن همان ژول بر مترمکعب می‌شود.

به منظور مشاهده ساختار سلولی و توزیع نانو ذرات آلومینا و ساختار حفرات، بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO1450VP(35kV) و میکروسکوپ نوری Olympus انجام گرفت. برای بررسی اندازه حفرات و درصد

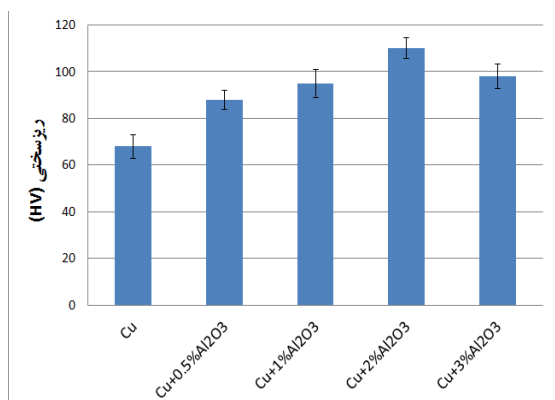
برای بررسی خواص مکانیکی فوم‌های تولیدی از آزمون فشار با استفاده از دستگاه ZWICK(Z250) استفاده گردید.

جدول (۱): مشخصات پارامترهای مورد بررسی در نمونه‌های تولیدی

نمونه	درصد وزنی ذرات تقویت کننده (% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	درصد وزنی عامل فوم ساز (% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
۱	-	۵۰٪ وزنی
۲	۰/۵٪	-
۳	۱٪	-
۴	۲٪	-
۵	۳٪	-
۶	۲٪	۱۵٪ وزنی
۷	۲٪	۲۰٪ وزنی
۸	۲٪	۳۰٪ وزنی
۹	۲٪	۴۰٪ وزنی
۱۰	۲٪	۵۰٪ وزنی

نرخ کرنش طبق استاندارد JIS H 7902 ژاپن،  $10^{-3} S^{-1}$  تنظیم شد [۲۰]. مقدار تنش پایا نیز بر اساس همین استاندارد، در محدوده کرنش ۲۰٪ تا ۳۰٪ محاسبه شد. کرنش چگالش با

نانو ذرات در قسمت‌های دیگر و در نتیجه کاهش سختی نانو کامپوزیت می‌شود [۲۲-۲۳]. از این رو در ادامه برای فوم‌سازی از ۲ درصد وزنی نانو ذرات اکسید آلومینیوم به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد.



شکل (۵): نتایج آزمون ریزسختی نانو کامپوزیتهای مس - آلومینا با درصد های مختلف وزنی از آلومینا

### ۳-۲- بررسی مورفولوژی حفرات

شکل ۶ (الف و ب) نمونه‌هایی از فوم تولیدی و تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه‌های فوم نانو کامپوزیت مس - آلومینا (درصد تخلخل ۵۰٪) را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، ساختار حفرات نسبتاً همگن بوده و میانگین اندازه حفرات ۴۰۰-۱۰۰ میکرومتر است. همچنین اکثر حفرات از نوع تخلخل بسته بوده و حفرات به هم راه ندارند. اندازه حفرات در روش متالورژی پودر با توجه به اندازه عامل فوم ساز (کربنات پتاسیم) تعیین می‌شود. در این تحقیق نیز قطر حفرات در همان محدوده ابعاد پودر کربنات پتاسیم اولیه بدست آمد. همچنین با توجه به پائین بودن درصد تخلخل، همانطور که در تحقیقات قبلی نیز به آن اشاره شده است [۲۴ و ۲۵]، نوع تخلخل بسته است. هنگامی که درصد پودر فلز به پودر عامل فوم ساز از حدود ۵۵٪ بیشتر می‌شود (درصدهای تخلخل زیر ۵۵٪)، با توجه به ریزتر بودن پودر فلز نسبت به پودر عامل فوم ساز، تقریباً یک لایه پیوسته از پودر فلز اطراف پودر عامل فوم ساز را حین مخلوط کردن می‌پوشاند. در ادامه‌ی فرایند تولید (پرس و تف‌جوشی)، این پوسته سخت شده

تخلخل سطحی نمونه‌ها از نرم‌افزار پردازش تصویر MIP استفاده شد.

چگالی نسبی و درصد تخلخل نمونه‌های تولیدشده با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه شدند.

$$\text{درصد تخلخل} = [1 - (\rho_f / \rho_s)] \times 100$$

(۲)

$$\text{چگالی نسبی} = \rho_f / \rho_s$$

(۳)

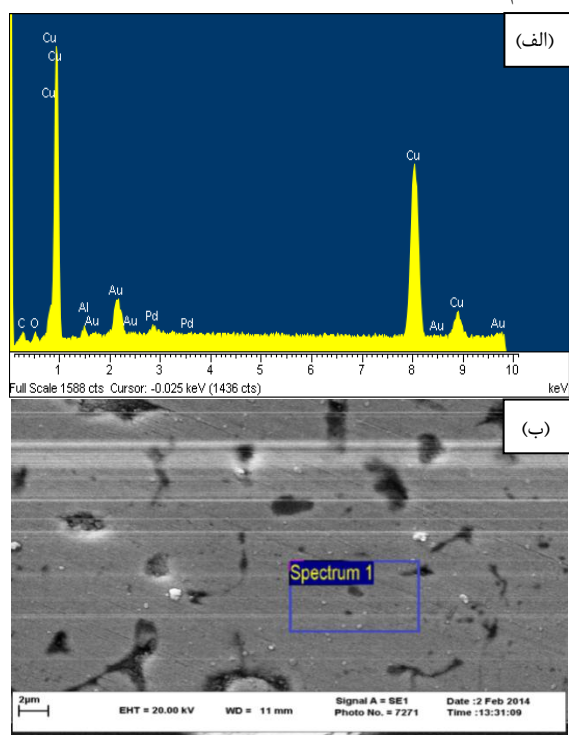
در این رابطه‌ها  $\rho_f$  چگالی فوم نانو کامپوزیتی مس - آلومینا و  $\rho_s$  چگالی تئوری نانو کامپوزیت مس - آلومینا است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی درصد ذرات پایدارکننده

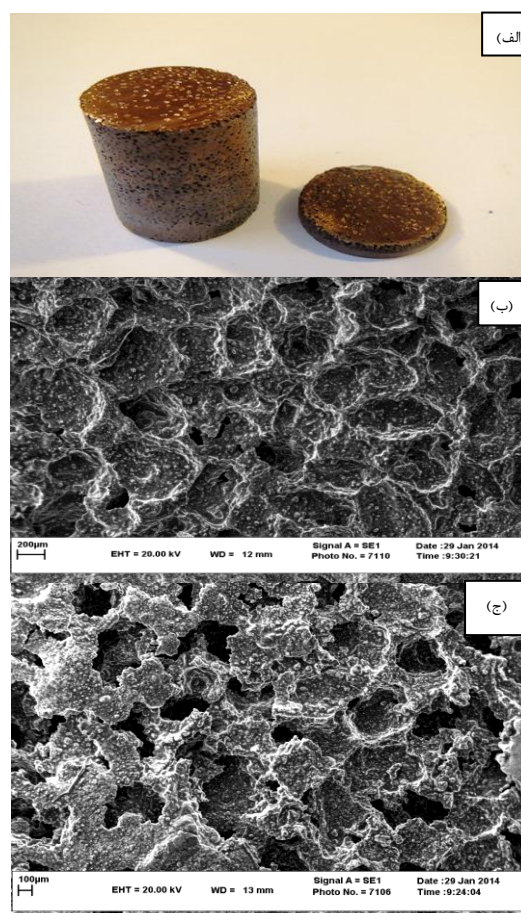
شکل ۵ نتایج به دست آمده از آزمون میکروسختی نمونه‌های نانو کامپوزیتی تهیه شده برای فرایند فوم سازی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش نانو ذرات اکسید آلومینیوم تا ۲ درصد وزنی، سختی افزایش می‌یابد. این افزایش سختی ناشی از حضور نانو ذرات در زمینه مس می‌باشد. نانو ذرات آلومینا مانند سایر ذرات سرامیکی که به عنوان فاز تقویت کننده استفاده می‌شوند، به خاطر اختلاف ثابت انبساط حرارتی که با زمینه فلزی دارند، در مرحله سرد شدن تا دمای محیط، چگالی بالایی از نابعایی‌ها را در زمینه به وجود می‌آورند. کرنش‌های عدم انطباقی به وجود آمده در فصل مشترک نانو ذرات و زمینه به عنوان مانعی در برابر حرکت نابعایی‌ها عمل کرده که نتیجه آن افزایش سختی نانو کامپوزیت حاصله، خواهد بود [۲۱]. در نمونه نانو کامپوزیتی ساخته شده با ۳ درصد وزنی نانو ذرات، سختی نسبت به نمونه تقویت شده با ۲ درصد وزنی، کاهش یافته است. علت این کاهش روند سختی با وجود افزایش درصد وزنی نانو ذرات آلومینا ممکن است به علت خوشه‌ای شدن و عدم پراکندگی یکنواخت نانو ذرات در زمینه، طی فرایند آسیاکاری باشد. واکنش ذرات با یکدیگر و خوشه‌ای شدن آنها در بخش‌هایی از زمینه منجر به کاهش درصد

۶۴/۲) گرفته شده است، نفوذ مناسب و تشکیل زمینه پیوسته در فرایند تفجوشی را نشان می‌دهد. نفوذ کامل پودرهای فلزی نشان دهنده دما و زمان مناسب تفجوشی است که در یک اتمسفر غیر اکسیدی انجام شده است. همچنین با مشاهده این تصویر مشخص می‌شود که یک پراکندگی نسبتاً یکنواخت از نانو ذرات آلومینا (نقاط سفید نشان داده شده در تصویر) در زمینه فلزی مس اتفاق افتاده است. البته در برخی نقاط مقداری کلوخه‌ای شدن نیز مشاهده می‌شود که در مقیاس نانو اجتناب ناپذیر است [۲۵]. این یکنواختی در پراکندگی نانو ذرات در زمینه مسی ناشی از اثر آسیاکاری مکانیکی و انرژی مناسب در نسبت مناسب گلوله به پودر است که از کلوخه‌ای شدن ذرات در زمینه جلوگیری می‌کند. همچنین آنالیز EDS گرفته شده از سطح نمونه، شباهت زیادی با آنالیز EDS نمونه‌های مخلوط شده پودری قبل از تفجوشی (شکل ۲) دارد. بنابراین می‌توان استنباط کرد که فرایند تفجوشی منجر به وارد شدن عنصری جدید به زمینه نشده است و خروج کربنات پتاسیم با افزایش دما همراه با واکنش ناخواسته‌ای با فوم فلزی نشده است.



شکل (۷): (الف): ریز ساختار جداره سلول و (ب): نتیجه آنالیز EDS منطقه مشخص شده در تصویر (الف)

و تبدیل به یک لایه پیوسته می‌شود. در نتیجه محصول، فوم تخلخل بسته می‌شود. در درصدهای بالاتر از پودر عامل فوم ساز نسبت به پودر فلز، با توجه به کم شدن نسبت پودر فلز به عامل فوم ساز، قابلیت شکل‌گیری این لایه پیوسته، نیست و بنابراین در عملیات پرس پودرهای عامل فوم ساز به هم رسیده و با هم در تماس هستند و بنابراین حین خروج در مرحله تفجوشی حفرات به هم راه خواهند داشت و محصول فوم تخلخل باز خواهد شد.



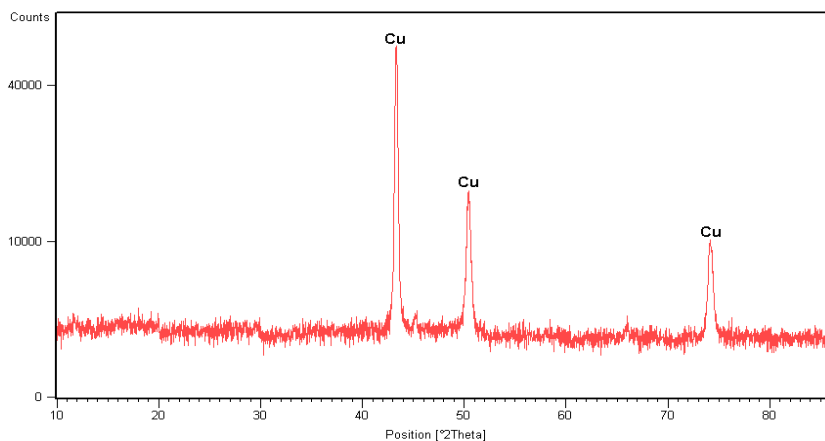
شکل (۶): (الف): تصاویر ماکروسکوپی و (ب و ج): میکروسکوپ الکترونی روبشی فوم نانو کامپوزیتی مس - آلومینا با درصد تخلخل ۵۰٪ با تخلخل بسته (ب) و ۶۸٪ با تخلخل باز (ج)

### ۳-۴- بررسی اثر ذرات پایدارکننده

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده در شکل ۷ که از جداره سلول نمونه فوم نانو کامپوزیتی (با درصد تخلخل

### ۳-۵- بررسی نتایج XRD

در شکل ۸، نتیجه آنالیز XRD مربوط به نمونه‌ای با ۶۸٪ تخلخل و ۲٪ آلومینا آورده شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، پیک‌های بدست آمده کاملاً شارپ با کانت مناسب تماماً مربوط به مس است. باید یادآور شد که تمامی نمونه‌های تولیدی همین رفتار را داشتند و بدین دلیل از آوردن نتایج XRD دیگر نمونه‌ها اجتناب شد.



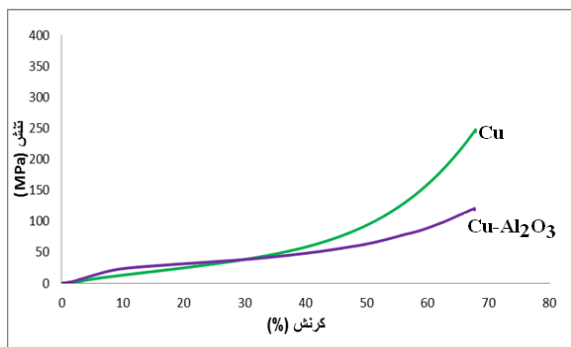
شکل (۸): نتایج آنالیز XRD مربوط به نمونه‌ای با ۶۸٪ تخلخل و ۲٪ نانو آلومینا

انتظار می‌رفت در این نمونه‌ها پیک‌های مربوط به  $Al_2O_3$  نیز خود را در آنالیز XRD نشان دهند، ولی به دلیل درصد پایین آن قابل تشخیص نبودند. از طرف دیگر این نتایج نشان می‌دهد محیط خنثی حین آسیاکاری و همچنین محیط احیایی حین تفجوشی مانع از تشکیل فاز جدید به ویژه اکسیدمس (CuO) شده است و یا مقدار آن در حدی نیست که تشخیص داده شود.

### ۳-۶- بررسی خواص مکانیکی

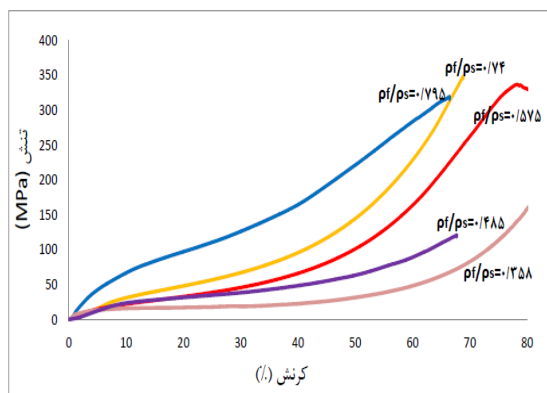
در شکل ۹ منحنی تنش - کرنش یک نمونه فوم معمولی مسی با یک نمونه فوم کامپوزیتی مس - آلومینا با درصد تخلخل برابر (درصد تخلخل حدود ۵۰٪) با هم مقایسه شده است. همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود نمونه‌ی کامپوزیتی دارای تنش پایایی بالاتری (حدود ۵ مگا پاسکال) نسبت به نمونه فوم مسی است. همچنین کرنش چگالش نمونه‌ها تغییر چندانی نداشته است. این نتایج نشان می‌دهد با استفاده از ذرات نانو آلومینا مقدار جذب انرژی ماده حدود ۱۷/۳۴ درصد افزایش داشته است. نانو ذرات آلومینا مانند سایر ذرات سرامیکی که به عنوان فاز تقویت کننده استفاده می‌شوند، به خاطر اختلاف ثابت انبساط حرارتی که با زمینه فلزی دارند، در مرحله سرد شدن تا دمای محیط، چگالی بالایی از نابعایی‌ها را در زمینه به وجود می‌آورند. کرنش‌های عدم انطباقی به وجود آمده در فصل مشترک نانو ذرات و زمینه به عنوان مانعی در برابر حرکت نابعایی‌ها عمل کرده که نتیجه آن افزایش سختی نانو کامپوزیت حاصله،

خواهد بود [۲۱]. بنابراین استحکام جداره سلولها افزایش یافته و منجر به افزایش استحکام فوم فلزی می‌شود. از طرف دیگر همانطور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، افزودن ذرات تقویت کننده در ابعاد نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در کنار درصد وزنی مناسب و توزیع همگن این ذرات در زمینه، انعطاف پذیری را کاهش نمی‌دهد [۱۶-۱۷].



شکل (۹): نتایج آزمون فشار فوم مسی و فوم کامپوزیتی مس با ۲ درصد وزنی نانو ذرات آلومینا

جنس نمونه و اندازه حفرات است [۲۳]، میزان چگالی نسبی تاثیر زیادی بر روی آن ندارد و این رفتار قابل پیش بینی بود.



شکل (۱۰): نتایج آزمون فشار فوم‌های تولیدشده با ۲ درصد وزنی نانو ذرات آلومینا و درصد‌های تخلخل متفاوت

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فوم نانو کامپوزیتی زمینه مسی تقویت‌شده با نانو ذرات آلومینا ( $Al_2O_3$ )، با استفاده از عامل فوم ساز کربنات پتاسیم ( $K_2CO_3$ ) و با به کارگیری روش فوم سازی پودر فشرده، تولید شد. نتایج تحقیق، توزیع و نفوذ سطحی مناسب نانو ذرات در زمینه مس و ساختار حفرات همگن را نشان داد که حاکی از مناسب بودن فرایند آسیاکاری مکانیکی برای تولید پودر نانو کامپوزیتی و دما و زمان تفجوشی مناسب طی مراحل تولید بود. نتایج نشان داد که کامپوزیت سازی پودرهای اولیه تاثیر منفی بر فرایند نفوذ و تفجوشی نداشته است. در نتایج XRD مربوط به نمونه‌های تولیدی اثری از فاز ناخواسته به ویژه CuO مشاهده نگردید. همچنین نتایج خواص مکانیکی مربوط به فوم مسی و فوم کامپوزیتی نشان داد افزودن ذرات نانو آلومینا به پودر مس اولیه منجر به افزایش استحکام (حدود ۱۷ درصد) و عدم کاهش انعطاف پذیری نمونه می‌شود. تنش پایای نمونه‌های تولیدشده با افزایش دانسیته نسبی افزایش داشت به گونه‌ای که افزایش دانسیته نسبی از ۰/۳۵۸ به ۰/۷۹۵ منجر به افزایش تنش پایا از ۱۸ به ۱۱۲/۵ مگا پاسکال شد. همچنین مقادیر جذب انرژی نیز با افزایش چگالی نسبی نمونه‌ها افزایش داشت و از ۹/۹۸ مگاژول

منحنی‌های تنش کرنش فشاری برای ۵ نمونه فوم نانو کامپوزیتی حاوی درصد‌های وزنی متفاوت از عامل فوم‌ساز و بنابراین درصد‌های تخلخل متفاوت در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود، نمودارهای تنش - کرنش برای نمونه‌های فوم با درصد‌های تخلخل متفاوت، همانند دیگر فوم‌های فلزی [۲۶] به سه ناحیه متمایز تقسیم می‌شوند. این سه ناحیه عبارت‌اند از ناحیه کشسان در کرنش‌های کمتر از ۱۰ درصد، ناحیه پلاتو در کرنش‌های متوسط بین ۱۰ تا ۴۰ درصد که کرنش در مقدار تقریباً ثابتی از تنش به میزان زیادی تغییر می‌کند و ناحیه متراکم شدن که در کرنش‌های بالاتر به وجود آمده و افزایش تنش با افزایش کرنش با شیب زیادی مشاهده می‌شود. آنچه از این منحنی‌ها استنباط می‌شود افزایش استحکام ( $\sigma_{PI}$ ) با کاهش درصد تخلخل است. کاهش استحکام فوم با افزایش درصد تخلخل به علت کم شدن ضخامت دیواره سلولها و افزایش حجم حفرات است. در واقع با افزایش درصد تخلخل مقدار سطح فلز در سطح مقطع کاهش می‌یابد و بنابراین استحکام ماده افت می‌کند. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که تغییر شکل نمونه‌ها کاملاً همگن بوده و اثری از شکست ناگهانی یا خرد شدن نمونه‌ها تحت بارهای اعمال شده نیست. این رفتار نشان‌دهنده خاصیت جذب انرژی فشاری مطلوب نمونه‌ها است و ناشی از پیوند خوب زمینه کامپوزیتی در نقاط اتصال حفرات و همچنین فرایند تفجوشی مناسب است. همچنین مقدار جذب انرژی هر نمونه متناسب با تغییر چگالی نسبی تغییر می‌کند و با افزایش مقادیر چگالی نسبی فوم، میزان جذب انرژی آن نیز افزایش می‌یابد. افزایش میزان جذب انرژی یک ماده به سطح زیر منحنی تنش - کرنش بستگی دارد. در این نمونه‌ها همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، افزایش دانسیته نسبی، منجر به افزایش تنش پایا و عدم تغییر کرنش چگالش شده است. بنابراین در واقع استحکام افزایش و انعطاف پذیری تغییر نکرده است. در این شرایط سطح زیر نمودار افزایش یافته است. از آنجایی که کرنش چگالش در فوم‌های فلزی بیشتر تحت تاثیر



- stainless steel". *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 203–206. 2006.
- [11] Y. Y. Zhao, T. Fung, L. P. Zhang & F. L. Zhang, "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams". *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 295–298. 2005.
- [12] D. X. Sun & Y. Y. Zhao, "Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process". *Materials Letters*. Vol. 59, pp. 6 – 10. 2005.
- [۱۳] ا. ح. مغنیان، ف. شجاعی پور، ک. پورآذرننگ، و پ. عباچی، "بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نانو کامپوزیت Cu/TiO<sub>2</sub> تولید شده به روش متالورژی پودر/ اکسیداسیون داخلی"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، اصفهان، انجمن علمی ریخته گری ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۳۹۰.
- [14] P.K. Jena, E. A. Brocchi, M. S. Motta, "In situ formation of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-scale composites by chemical routes and studies on their microstructure", *Material Science Engineering A*, Vol. 313, pp. 180-186. 2001.
- [15] D. Y. Ying & D. L. Zhang, "Processing of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix nano composite material by high energy ball milling". *Material Science Engineering*, Vol. A 286, pp. 152-156. 2000.
- [16] K. M. Mussert, W. P. Vellinga, A. Bakker & S. Van Der Zwaag, "A nano-indentation study on the mechanical behavior of the matrix material in an AA6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC", *Materials Science*, Vol. 37, pp. 789–794. 2002.
- [17] Y. Yang, J. Lan & X. Li, "Study on bulk aluminum matrix nano-composite fabricated by ultrasonic dispersion of nano-sized SiC particles in molten aluminum alloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 380, pp. 378–383. 2004.
- [۱۸] ع. نبوی، ج. وحدتی خاکی، "تولید کامپوزیت پایه مس تقویت شده با ذرات آلومینا و کاربیدسیلیسیم به روش آسیاکاری مکانیکی و ارزیابی ریزساختاری آن"، سومین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران، اصفهان، انجمن علمی ریخته گری ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۳۸۵.
- [19] F. Shehata, M. Abdelhameed, A. Fathy & M. Elmahdy, "Preparation and Characteristics of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite", *Open Journal of Metal*, Vol. 1, pp. 25-33. 2011.
- بر متر مکعب برای کمترین دانسیته نسبی تا ۲۸/۲۰ مگاژول بر متر مکعب برای بالاترین دانسیته نسبی متغیر بود.
- ### ۵- مراجع
- [1] N. Ramakrishnan, "An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites". *Acta Materialia*, Vol. 44, pp. 69-77. 1996.
- [2] J. Hashim, L. Looney & M. S. J. Hashmi, "The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy". *Materials processing Technology*, Vol. 119, pp. 324-328. 2001.
- [۳] م. گلستانی پور و م. توکلی، "بررسی جذب انرژی پیل های ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم تحت آزمون سوراخ کاری"، مجله مواد نوین؛ جلد ۳، شماره ۲، صفحه ۲۵-۳۸. ۱۳۹۱.
- [4] Y. Y. Zhao, T. Fung, L. P. Zhang & F. L. Zhang, "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams". *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 295–298. 2005.
- [5] A. Simone & I. G. Gibson, "Aluminum foams produced by liquid-state processes". *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 3109–3123. 1998.
- [6] I. Duarte & J. Banhart, "A study of aluminium foam formation-kinetics and microstructure". *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 2349-2362. 2000.
- [7] Y. Zhao, F. Han & T. Fung. "Optimization of compaction and liquid-state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams". *Materials Science and Engineering A*. Vol. 364, pp. 117–125. 2004.
- [8] H. Nakajima, S. K. Hyun, K. Ohashi, K. Ota & K. Murakami. "Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties" *Journal of Colloids Surface. A physicochemistry Engineering Aspects*. Vol. 179, pp. 209-214. 2001.
- [9] Q. Z. Wang, C. X. Cui, S. J. Liu & L. C. Zhao, "Open-celled porous Cu prepared by replication of NaCl space-holders". *Materials Science and Engineering Vol. A* 527, pp. 1275–1278. 2010.
- [10] Halil & I. Bakan, "A novel water leaching and sintering process for manufacturing highly porous

- Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 559-632. 2001.
- [25] H. Mahboob, S. A. Sajjadi & S. M. Zebarjad, "Influence of nanosized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> weight percentage on microstructure and mechanical properties of Al-matrix nanocomposite", Powder Metallurgy Vol. 54, pp. 148-152. 2011.
- [26] J. Park & S. Hyun, "Effect of Pore Morphology on Compressive Yield Strength of Lotus-Type Porous Copper with Various Specimen Sizes", Materials Transactions, Vol. 47, pp. 2208-2212. 2006.
- [20] N. Kanetake, T. Miyoshi, H. Nakajima & F. Ono, "International Standard for Compression Test of Porous and Cellular Metals", JIS Standard, Japan.
- [21] B. Abbasipour, B. Niroumand & S. M. Monirvaghefi, "Compcasting of A356-CNT Composite", Transaction of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. 1561-1566. 2010.
- [22] B. Abbasipour, B. Niroumand & S. M. Monir Vaghefi, "Compcasting of A356-CNT composite", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. 1561-1566. 2010
- [23] D. Abdul Saheb, "Aluminum silicon carbides and aluminum graphite particulate composites", Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 6, pp. 41-46. 2011.
- [24] J. Banhart & Prog, "Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foam"

### ۶- پی نوشت

- 
- [1] Precursor  
 [2] Lost Carbonate Sintering  
 [3] Metal matrix nano-composite