



## زیئتر نانو کامپوزیت $\text{CuNi-Al}_2\text{O}_3$ کمک مایکروویو بررسی خواص تریبولوژیکی و خوردگی

محمد باغانی<sup>۱</sup>، محمود علی اف خضرایبی<sup>۲</sup>، رضا پورصالحی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه تربیت مدرس (دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد)

<sup>۲</sup> دانشگاه تربیت مدرس (استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد)

<sup>۳</sup> دانشگاه تربیت مدرس (استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، گروه نانو مواد)

### چکیده

در این تحقیق تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر ریزساختار، خواص تریبولوژیکی و خوردگی نانو کامپوزیت مس نیکل (آلومینا) بررسی شد. مخلوط پودر مس و نیکل به همراه ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد حجمی آلومینا تحت فرآیند آسیاب کاری مکانیکی قرار گرفت. نتایج نشان داد پس از ۳۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، محلول جامد مس نیکل تشکیل شده است. پودر آلیاژسازی شده با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک سرد فشرده گردید و فرآیند زیئتر قرص ها در کوره مایکروویو انجام شد. مورفولوژی سطح مقطع نمونه های زیئتر شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. ریزساختار نمونه های زیئتر شده متراکم و بدون ترک و منفذ بود. خواص تریبولوژیکی توسط آزمون سایش pin on disk بررسی شد که در نتیجه ی آن با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا در نانو کامپوزیت، نرخ کاهش جرم کاهش یافت. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات آلومینا به زمینه ی محلول جامد مس نیکل باعث بهبود خواص سایشی می شود. رفتار خوردگی نمونه ها توسط منحنی پلاریزاسیون برگشتی در محلول ۱ مولار NaOH بررسی شد. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات آلومینا تاثیر محسوسی بر روی خواص خوردگی آلیاژ محلول جامد ندارد.

واژه های کلیدی: نانو کامپوزیت، زیئتر مایکروویو، خوردگی، تریبولوژیکی، نانوذرات.

مس به دلیل هدایت حرارتی و الکتریکی عالی، مقاومت خستگی و مقاومت خوردگی خوب کاربرد گسترده‌ای در وسایل الکتریکی و حرارتی دارد. اگرچه مس دارای استحکام مکانیکی ضعیف و ضریب انبساط حرارتی بالایی است [۱]. با افزودن عناصر آلیاژی حل شونده مانند مولیبدن، تیتانیم و نیکل و تولید محلول جامد، می‌توان استحکام را افزایش داد. با انتخاب عناصر آلیاژی با انحلال ناچیز در مس در حالت تعادلی، بدون تغییر در رسانایی الکتریکی، استحکام افزایش می‌یابد [۲]. آلیاژ محلول جامد مس نیکل از طریق فرآیند جانشینی تشکیل می‌شود و هردو فلز دارای ساختار شبکه fcc هستند. این آلیاژها به دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی مطلوب کاربرد فراوانی در صنعت و تکنولوژی دارند. این آلیاژها در محیط‌های اسیدی، بازی، اکسیدی و احیایی دارای مقاومت به خوردگی بالایی هستند. چنانچه در محیطی قرار بگیرد که عامل احیا کننده در آن اکسیژن باشد مانند آب دریا، در فصل مشترک سطح آلیاژ و محیط خورنده لایه اکسیدی تشکیل می‌شود که بسیار چسبیده بود و به شکست موضعی و خوردگی حفره‌ای در محیط کلریدی حساس نیست، همچنین لایه اکسید سطحی با کاهش واکنش انحلال آندی از سطح قطعه در برابر خوردگی حفاظت می‌کند [۳].

آلیاژهای مس نیکل به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند از قبیل آسیاب کاری مکانیکی [۴]، فرآیند ترمو-شیمیایی [۲]، روش‌های الکتروشیمیایی [۵] و [۶] و احیا در فاز مایع [۷] و [۸]. افزودن ذرات سخت آلومینا به آلیاژهای پایه مس به عنوان فاز تقویت کننده باعث تولید نانو کامپوزیت‌هایی با ویژگی‌های هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، مقاومت سایشی مناسب، پایداری در برابر گرما و رفتار خستگی بهتر نسبت به مس تقویت نشده می‌شود. کامپوزیت‌های پایه مس تقویت شده با ذرات آلومینا چقرمگی شکست بالایی دارند که این چقرمگی شکست با کوچکتر شدن اندازه ذرات آلومینا در ساختار مس افزایش می‌یابد. گزارش شده است که این خواص به دلیل قفل شدن مرزخانه‌های زمینه مسی با ذرات آلومیناست. برخلاف روش‌های مذاب، روش آلیاژسازی مکانیکی، روش مطلوبی برای پخش یکنواخت ذرات در زمینه فلزی است [۹]. شکست و جوش ذرات طی فرآیند آلیاژسازی مکانیکی باعث آمیخته شدن مقدار زیادی فاز تقویت کننده در داخل هر ذره فلزی در حالت جامد و تشکیل ذرات کامپوزیتی می‌شود [۱۰]. Seung و همکارانش [۱۱] تولید نانو کامپوزیت مس آلومینا به روش مکانوشیمیایی از طریق آسیاب کاری مکانیکی پودرهای  $\text{CuO}_2$ ، Cu و Al گزارش کردند. نانو کامپوزیت‌های مس آلومینا با درصدهای مختلف آلومینا با موفقیت تولید شد. پودر آسیاب کاری شده توسط پرس گرم در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد متراکم شد. با افزایش درصد آلومینا، سختی نمونه‌های پرس گرم، از ۷۰ به ۱۰۳ را کول افزایش یافت. Durivault و همکارانش [۱۲] آلیاژسازی مس نیکل توسط آسیاب کاری مکانیکی را گزارش کردند. تحت شرایط بهینه آلیاژ مس نیکل با بازده ۹۵ درصد و مقدار ناخالصی آهن بسیار کم تهیه شد. از آنجایی که فعالیت الکتروکاتالیتی مس نسبت به نیکل بیشتر است، با افزایش مقدار مس در ترکیب آلیاژ، نرخ تجزیه نیترات در محلول قلیایی افزایش می‌یابد. Pabi و همکارانش [۱۳] تولید آلیاژ محلول جامد مس نیکل را گزارش کردند. در طول فرآیند آسیاب کاری مکانیکی فاز بین فلزی/محلول جامد توسط مکانیزم

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

مخلوط سازی نفوذ پیوسته انجام شد. پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری، ذرات بلورین با اندازه درشت ۳۰ نانومتر تولید می شود که دلیل آن خاصیت چکش خواری محلول جامد fcc است.

خواص فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت به درصد حجمی و اندازه ی نانوذرات فاز تقویت کننده، یکنواختی توزیع این نانوذرات در شبکه فلزی و پیوند میان نانوذرات تقویت کننده و زمینه فلزی بستگی دارد [۱۴]. وجود نانوذرات تقویت کننده در نانوکامپوزیت ها ممکن است از طریق کوپل گالوانیک، خوردگی موضعی و یا خوردگی انتخابی بر روی رفتار خوردگی تاثیر بگذار [۱۵]. در این تحقیق تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر ریزساختار، خواص تریبولوژیکی و خوردگی نانوکامپوزیت مس نیکل (آلومینا) بررسی شد. مخلوط سازی پودر های مس و نیکل به همراه نانوپودر آلومینا در آسیاب گلوله ای ماهواره ای انجام شد و سپس توسط دستگاه پرس هیدرولیک قرص هایی تهیه و در کوره مایکروویو زینتر شدند. آزمون سایش pin on disk به منظور بررسی تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر روی خواص تریبولوژیکی انجام شد. همچنین از منحنی پلاریزاسیون برای بررسی خواص خوردگی نمونه های زینتر شده در محلول ۱ مولار NaOH استفاده شد.

#### مواد و روش تحقیق

پودرهای مس خالص با اندازه ۲۰ میکرومتر و نیکل خالص با اندازه ۴۵ میکرومتر و نانوپودر آلومینا با اندازه ۵۰ نانومتر، به عنوان مواد اولیه برای آلیاژسازی و تهیه نانوکامپوزیت استفاده شد. مخلوط پودری با ترکیب های Cu-30Ni، Cu-30Ni-5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Cu-30Ni-10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تحت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفتند. فرآیند آلیاژسازی مکانیکی در دستگاه آسیاب گلوله ای ماهواره ای به مدت ۳۰ ساعت در دمای اتاق انجام شد. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون مخلوط پودر، فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تحت گاز آرگون انجام شد. نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ و سرعت خرجش محفظه ۳۰۰ دور بر دقیقه بود. پودر آلیاژسازی مکانیکی شده توسط آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) توسط دستگاه X'Pert MPD Philips با پرتو Cokα با طول موج ۱/۷۸۹ آنگستروم مشخصه یابی شد. مورفولوژی پودرها توسط میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM) Philips XL30 و مورفولوژی نانوپودر آلومینا توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) Zeiss EMIOIC بررسی شد (شکل ۱ ح).

پودر آلیاژسازی مکانیکی شده با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک سرد با فشار ۳۵۰ مگاپاسکال و قالبی به قطر ۲۵ میلی متر پرس و قرص هایی با ضخامت ۳ میلی متر تهیه شد. قرص ها در کوره مایکروویو ۲,۴۵ GHZ با توان ۶۰۰ وات و به مدت زمان ۹۰ دقیقه زینتر شدند. ریزساختار سطح مقطع نمونه های زینتر شده توسط میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM Philips XL30) بررسی شد. ریزسختی نمونه ها توسط آزمون ریزسختی سنجی با استفاده از فرورونده ویکرز در بار ۱۰۰ گرمی و زمان توقف ۵ ثانیه اندازه گیری شد. جهت بررسی خواص تریبولوژیکی نمونه ها از دستگاه سایش پین روی دیسک (ASTM G99 standard) در دمای اتاق و در حالت خشک استفاده شد. در این آزمون از پین ساینده از جنس اکسید آلومینیم استفاده گردید.

طول مسیر سایش ۱۴۰ متر، بار قائم ۲ نیوتن و سرعت سایش ۱۰۰ دور بر دقیقه بود. رفتار خوردگی نمونه ها توسط منحنی پلاریزاسیون برگشتی در سل سه الکترودی حاوی محلول ۱ مولار NaOH با استفاده از پتانسیواستات EG&G Instruments Inc بررسی شد. برای این منظور ابتدا پتانسیل مدار باز نمونه ها اندازه گیری شد و سپس منحنی پلاریزاسیون برگشتی در محدوده -۲۰۰ میلی ولت تا +۲۰۰۰ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز با نرخ ۲ میلی ولت بر ثانیه بررسی شدند.

### نتایج و بحث

شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودر مس ۷۰- نیکل ۳۰ را پس از آسیاب کاری مکانیکی نشان می دهد. ملاحظه می گردد که پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری، پیک های مربوط به نیکل و مس حذف شده و پیک های جدیدی ظاهر می شود که منطبق با پیک های اصلی فاز  $Cu_{0.81}Ni_{0.19}$  می باشد. حین فرآیند آسیاب کاری مکانیکی اتم های نیکل به تدریج وارد ساختار مس شده و در نتیجه پیک های نیکل حذف شده و پارامتر شبکه مس افزایش می یابد که منجر به جایجایی پیک های مس به ۲ کمتر یعنی به سمت چپ می شود. با مقایسه پیک صفحه (۱۱۱) مس در ۱ و ۳۰ ساعت آسیاب کاری مشخص است که ۲ از  $50/727$  درجه به  $50/454$  درجه انتقال یافته است که تاییدی بر نفوذ نیکل به درون ساختار مس است. بنابراین پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی محلول جامد مس (نیکل) تشکیل شده است [۱۶]. پهن شدگی پیک ها ناشی از کاهش اندازه دانه و افزایش کرنش شبکه می باشد [۱۷]. در مواد کریستالی، پهنای پیک پراش پرتو ایکس با کاهش ضخامت صفحات کریستالی افزایش می یابد. در فرآیند آسیاب کاری مکانیکی، آلیاژ سازی در ابعاد اتمی رخ می دهد که باعث تشکیل محلول های جامد، ترکیبات بین فلزی و حتی فازهای آمورف می گردد که این مسئله باعث کاهش شدت پیکها می شود. افزون بر این، در این مرحله، فاصله بین لایه ها به قدری کاهش می یابد که منجر به کاهش شدت پیک ها در الگوی پراش اشعه می شود [۱۸].

تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی ذرات پودر پس از آسیاب کاری مکانیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. تفاوت در مورفولوژی و اندازه دانه ی پودرها قبل و بعد از آسیاب کاری به وضوح مشاهده می شود. پس از ۳۰ ساعت آلیاژ سازی مکانیکی، شکل ذرات ورقه ای است و توزیعی از ذرات کوچک در حدود ۳۰ میکرومتر می باشد [۲۰]. کاهش اندازه ذرات پودر به دلیل نفوذ ذرات سخت نیکل به درون ذرات نرم مس در طول فرآیند آسیاب کاری است. رسیدن به حالت تعادل بین جوش سرد و شکستن ذرات پودر باعث جلوگیری از فرآیند آگلومره شدن شده است [۲۱].

شکل ۴ ریزساختار سطح مقطع نمونه های زینتر شده را پس از اچ کردن نشان می دهد. نخستین نکته که باید به آن اشاره کرد این است که وجود نانوذرات آلومینا تغییرات ساختاری ایجاد نمی کند و ریزساختار و اندازه دانه بندی هر سه نمونه یکنواخت و شبیه هم است. حرارت دهی مواد توسط مایکروویو بستگی به خواص دی الکتریک آن ماده دارد. مس در محدوده ی وسیعی از دما و فرکانس دارای تلفات دی الکتریک بالایی است

که منجر می شود جذب انرژی میکروویو خوبی داشته باشد. مکانیزم زینتر پودر متراکم فلزات به کمک میکروویو نفوذ مرزخانه ای است [۲۲]. در ریزساختار سطح مقطع، هیچگونه ترک و تخلخلی مشاهده نمی شود که حاکی از موثر بودن فرآیند زینتر توسط میکروویو می باشد.

نتایج حاصل از آزمون سایش پس از اندازه گیری کاهش جرم در هر مرحله، ثبت شد. شکل ۵ نمودار نقطه ای کاهش جرم در مسافت های لغزش مختلف برای نمونه های مختلف می باشد. با افزایش درصد نانوذرات آلومینا در نانو کامپوزیت، میزان کاهش جرم در آزمون سایش کاهش می یابد. به عبارتی حضور نانوذرات آلومینا باعث بهبود خواص سایشی نانو کامپوزیت می شوند [۲۳].

رفتار خوردگی نانو کامپوزیت ها با استفاده از روش پلاریزاسیون در محلول ۱ مولار NaOH مورد بررسی قرار گرفت و نمودار پلاریزاسیون آنها گزارش شد (شکل ۶). آلیاژ محلول جامد مس نیکل در محلول NaOH دارای فیلم پسیو است. مقاومت آلیاژ مس نیکل در برابر خوردگی وابسته به ایجاد فیلم محافظ نازک CuO روی سطح است که به صورت مانع در برابر اکسیداسیون عمل می کند [۲۴]. در هر سه نمونه فیلم روپین تشکیل شده روی سطح پایدار است. از آنجایی که مقدار جریان در مسیر پلاریزاسیون رفت بیشتر از جریان پلاریزاسیون برگشتی است، آلیاژ مقاوم به خوردگی حفره ای می باشد. بنابراین می توان این گونه نتیجه گرفت که واکنش های شیمیایی و مکانیزم خوردگی در هر سه نمونه مشابه یکدیگر است.

پارامترهای خوردگی مانند چگالی جریان، پتانسیل خوردگی، شیب آندی و کاتدی از داده های حاصل از پلاریزاسیون در محلول ۱ مولار NaOH در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۱، مشخص است که وجود نانوذرات آلومینا در آلیاژ باعث کاهش اندکی در مقاومت به خوردگی می شود ولی این کاهش مقاومت به خوردگی ناچیز است. مرز بین فاز آلومینا و زمینه فلزی مکان ترجیحی در برابر خوردگی هستند بنابراین حساسیت نانو کامپوزیت در برابر خوردگی بیشتر است و مقاومت به خوردگی کاهش می یابد [۲۵]. در این شرایط مکانیزم خوردگی آلیاژ از نوع انتخابی است.

### نتیجه گیری

۱) پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی، اتم های نیکل به تدریج وارد ساختار مس شده و محلول جامد مس (نیکل) تشکیل شده است.

۲) با افزایش درصد نانوذرات آلومینا در نانو کامپوزیت، میزان ضریب سایش و نرخ کاهش جرم کاهش می یابد.

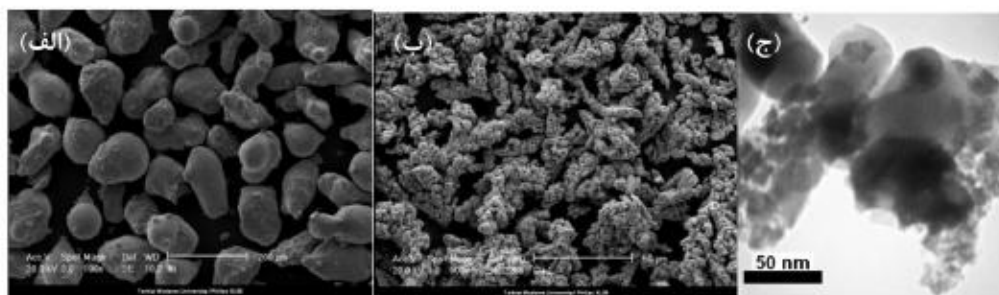
۳) وجود نانوذرات آلومینا در آلیاژ، باعث کاهش اندکی در مقاومت به خوردگی می شود ولی این کاهش مقاومت به خوردگی ناچیز است. آلیاژ محلول جامد مس نیکل در محلول NaOH دارای فیلم پسیو است و از آنجایی که مقدار جریان در مسیر پلاریزاسیون رفت بیشتر از جریان پلاریزاسیون برگشتی است، آلیاژ مقاوم به خوردگی حفره ای می باشد.

1. Davis, Joseph R., ed. Copper and copper alloys. ASM international, 2001.
2. Suryanarayana, Challapalli. "Mechanical alloying and milling." *Progress in materials science* 46.1 (2001): 1-184.
3. Jaron, A., and Z. Zurek. "New porous Fe<sub>64</sub>/Ni<sub>36</sub> and Ni<sub>70</sub>/Cu<sub>30</sub> electrodes for hydrogen evolution—Production and properties." *Solid State Ionics* 181.21 (2010): 976-981.
4. Durivault, Laurence, et al. "Cu–Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1 (2007): 323-332.
5. Ghosh, S. K., et al. "Nanocrystalline Ni–Cu alloy plating by pulse electrolysis." *Surface and Coatings Technology* 126.1 (2000): 48-63.
6. Glibin, V. P., B. V. Kuznetsov, and T. N. Vorobyova. "Investigation of the thermodynamic properties of Cu–Ni alloys obtained by electrodeposition or by casting." *Journal of alloys and compounds* 386.1 (2005): 139-143.
7. Rao, G. Ranga, Braja Gopal Mishra, and H. R. Sahu. "Synthesis of CuO, Cu and CuNi alloy particles by solution combustion using carbonylhydrazide and N-tertiarybutoxy-carbonylpiperazine fuels." *Materials Letters* 58.27 (2004): 3523-3527.
8. Chatterjee, Jhunu, et al. "Synthesis and characterization of polymer encapsulated Cu–Ni magnetic nanoparticles for hyperthermia applications." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 293.1 (2005): 303-309.
9. Ying, D. Y., and D. L. Zhang. "Processing of Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling." *Materials Science and Engineering: A* 286.1 (2000): 152-156.
10. Gao, Guozhong. "Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties and applications." (2004): 433.
11. Hwang, Seung J., and Jin-hyung Lee. "Mechanochemical synthesis of Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites." *Materials Science and Engineering: A* 405.1 (2005): 140-146.
12. Durivault, Laurence, et al. "Cu–Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1 (2007): 323-332.
13. Pabi, S. K., et al. "Nanocrystalline phases in Cu–Ni, Cu–Zn and Ni–Al systems by mechanical alloying." *Nanostructured Materials* 9.1 (1997): 149-152.
14. Besterci, Michal, et al. "The mechanism of the failure of the dispersion-strengthened Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosystem." *Journal of materials science* 45.15 (2010): 4073-4077.
15. LH Hihara, RM. Latanision, Corrosion of metal matrix composites, *Int Mater Rev*, 39 (1994): 245–264
16. B.N. Mondal, A. Basumallick, P.P. Chattopadhyay, *J. Magn. Magn. Mater.* 309 (2007): 290–294.
17. Callity, B. D., *Elements of X-ray diffraction*, 2nd ed., Menlo park, 1978.
18. J.B. Fogagnolo, F. Velasco, M.H. Robert, and J.M. Torralba, "Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminums matrix composite powders", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 342, pp 131-143, 2003.
19. C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying and Milling", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, 2001.
20. Durivault, Laurence, et al. "Cu–Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1 (2007): 323-332.
21. Farahbakhsh, Iman, et al. "Structural Evolution of the Cu–Ni Solid Solution Formed by Ball Mechanical Alloying Treatment (BMAT)." *Materials Science Forum*. Vol. 673. 2011.

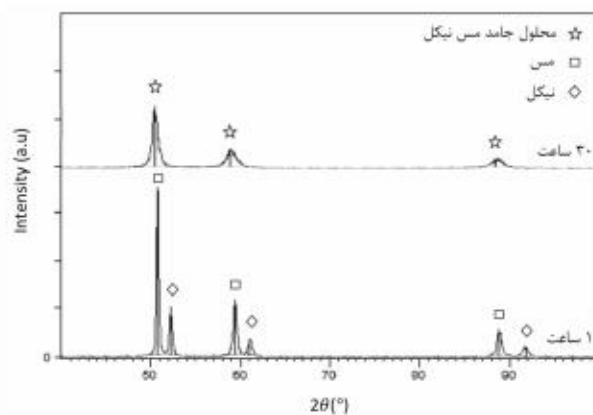
22. Mishra, Radha Raman, S. Rajesha, and A. K. Sharma. "Microwave Sintering of Pure Metal Powders—A Review."
23. Helle, S., et al. "Mechanically Alloyed Cu-Ni-Fe-O Based Materials as Oxygen-Evolving Anodes for Aluminum Electrolysis." *Journal of The Electrochemical Society* 159.4 (2012): E62-E68.
24. Goupil, Gregory, et al. "Consolidation of mechanically alloyed Cu-Ni-Fe material by spark plasma sintering and evaluation as inert anode for aluminum electrolysis." *Journal of Alloys and Compounds* 580 (2013): 256-261.
25. Raju, L. Suvarna, and A. Kumar. "A Novel Approach for Fabrication of Cu-Al  $2\text{O}_3$  Surface Composites by Friction Stir Processing." *Procedia Materials Science* 5 (2014): 434-443.

جدول ۱: اندازه گیری پارامترهای خوردگی در محلول ۱ مولار NaOH

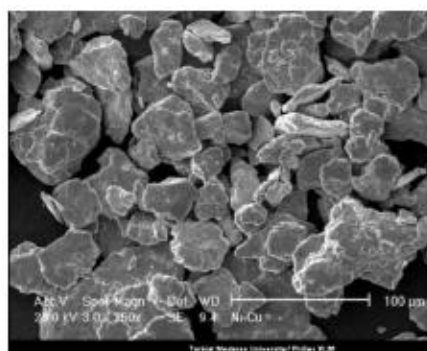
نمونه	$E_{\text{corr}}$ (mV) vs SCE	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
مس نیکل	-۵۲۶	۳۹۵,۲
مس نیکل ۵ درصد آلومینا	-۵۴۹	۷۲۳,۵
مس نیکل ۱۰ درصد آلومینا	-۵۷۵	۹۸۹,۷



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات (الف) پودر نیکل و (ب) مس و (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات آلومینا قبل از آسیاب کاری مکانیکی



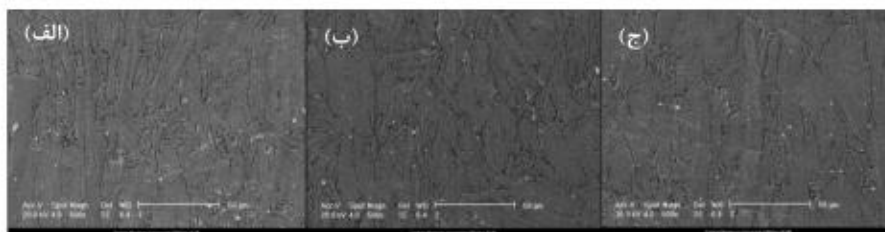
شکل ۲: الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودر مس ۷۰-نیکل ۳۰ پس از ۱ و ۳۰ ساعت آسیاب کاری



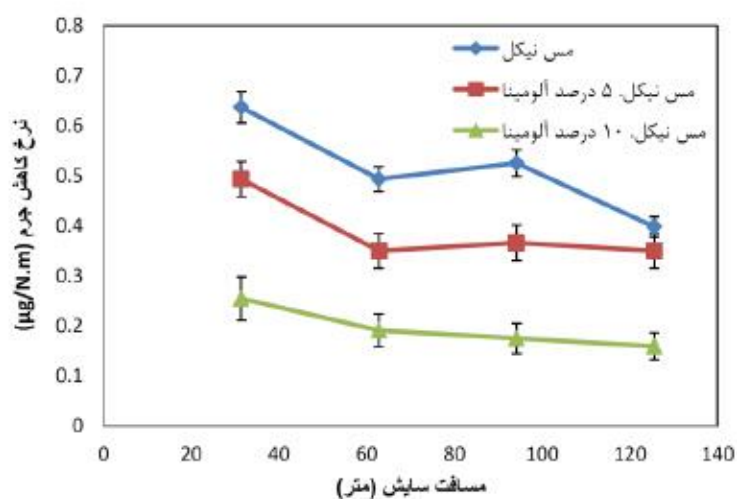
شکل ۳: مورفولوژی مخلوط پودر مس نیکل پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری



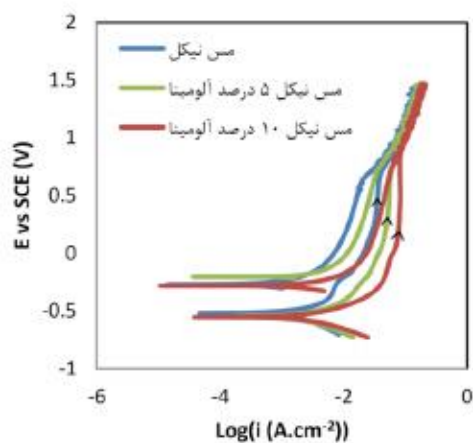
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۴: ریزساختار سطح مقطع نانو کامپوزیت های زیتر شده مس نیکل (الف)، مس نیکل ۵ درصد آلومینا (ب) و مس نیکل ۱۰ درصد آلومینا (ج)



شکل ۵: نمودار کاهش جرم بر حسب مسافت سایش



شکل ۶: منحنی پلاریزاسیون نانو کامپوزیت های نیکل مس