

# بررسی تجربی تأثیر فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی بر ریز ساختار و سختی کامپوزیت مس - آهن تولید شده به روش متالورژی پودر

محمد زادشکویان\*

بهزاد ابادری اسفهلان

دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، zdashakoyan@tabrizu.ac.ir

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ayobkarimzad@gmail.com

## چکیده

هدف از این پژوهش تولید کامپوزیت مس-آهن به روش متالورژی پودر در کانال زاویه‌دار مساوی و بررسی ریزساختار و سختی آن بعد از فرایند است. مس و آهن اتمیزه با دانه بندی زیر ۶۳ میکرون با نسبت ۹ به ۱ مخلوط و سپس در داخل قالب استوانه‌ای، با فشار ۴۵۰ مگاپاسکال فشرده شد. نمونه‌ها در داخل کوره تونلی با دمای ۹۲۰ درجه سلسیوس تفجوشی شده، سطح آن‌ها سنگ‌زنی و تحت فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی چند پاسه با فشار برگشتی قرار گرفت. ارزیابی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که سختی برای نمونه سه پاس پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی در مقایسه با نمونه تفجوشی شده خام، حدود ۱۹۰ درصد افزایش یافته است. متوسط اندازه دانه‌های کامپوزیت مس-آهن با ۳ درصد نیکل یک پاسه، در مقایسه با حالت سه پاسه به میزان ۵۳ درصد کاهش یافته است. چگالی نظری نمونه‌ها پس از تولید، به صورت چشمگیری افزایش یافته، بطوریکه مقدار چگالی از ۸۸ درصد برای نمونه تفجوشی شده خام به مقدار ۹۸ درصد برای نمونه‌ها در شرایط فرایند پرس شده سه پاسه در کانال زاویه‌دار مساوی، افزایش نشان می‌دهد. **واژه‌های کلیدی:** پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، کامپوزیت مس-آهن، متالورژی پودر، شکل دهی سریع، میکروساختار، سختی.

## Study on the Effect of Multi Pass ECAP with Back Pressure on Microstructure and Hardness of Cu-Fe Composite Produced by Powder Metallurgy with Ni Nanoparticle

M. Zad Shakouyan  
B. Abazari-Esfahlan

Department of Manufacturing and Production, Tabriz University, Tabriz, Iran.  
Department of Manufacturing and Production, Tabriz University, Tabriz, Iran.

### Abstract

The main goal of this study is to produce the copper-iron composite by powder metallurgy method and to investigate its microstructure and hardness after ECAP process. The copper with atomized iron with a grain size less than 63 microns were mixed with the ratio of 9:1, then pressed inside a cylindrical mold at the pressure of 450 MPa. The samples were compacted and sintered in a tunnel kiln with a temperature of 920 °C, then their surfaces were ground and subjected to a multi-pass ECAP process with back pressure. The performed evaluation indicate that the hardness for the sintered Copper-Iron metal matrix composite sample prior to the ECAP process was increased up to 190% after third pass. The average grain size of iron-copper composite in three pass decreased to 53% compared to the same composite on one pass. The theoretical density of the samples increased significantly after the ECAP process, so that the density value increased from 88% for the raw sintered sample to 98% for the samples in the three-pass ECAP condition.

**Keywords:** ECAP, Copper-Iron metal matrix Composite, Powder Metallurgy, Rapid Forming, Microstructure, Hardness.

زمینه تولید آنها به نسبت کم است. مواد اصطکاکی زمینه فلزی معمولاً به سه دسته پایه مس، پایه آهن و پایه مس-آهن طبقه‌بندی می‌شوند. مواد با پایه مس دارای مزایای بسیاری از جمله هدایت گرمایی و مقاومت اصطکاکی بالا هستند که باعث افزایش کاربرد آنها در زمینه‌های مختلف شده است. Fe و SiO<sub>2</sub> متداول‌ترین نوع افزودنی به مواد روان‌کننده جامد هستند [۱-۵].

از جمله روش‌های تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌توان روش متالورژی پودر را نام برد [۶]. از این روش بیشتر برای تولید قطعات با شکل‌های پیچیده، دقت بالا و حجم تولید انبوه استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های سنتی مثل ریخته‌گری، فورج و فرایندهای مکانیکی، در این فرایند ترکیبات پایدار و قابل کنترل‌تر بوده و ویژگی‌های خاص دیگری از جمله دامنه گسترده‌ی مواد، بهره‌وری بالا، مشخصات فنی، صرفه‌جویی در مصرف مواد، انرژی و غیره را داراست. امروزه بیش از ۷۰٪ پودرهای متالورژی تولید شده در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعات تولیدی به روش

### ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی از جمله کامپوزیت‌های جدید هستند که روز به روز خواص آن‌ها بهبود یافته و شناخت ساختاری و مکانیکی آن‌ها، کاربرد این مواد را رواج بخشیده است. کامپوزیت‌های زمینه فلزی از یک جزء زمینه فلزی و یک جزء تقویت‌کننده تشکیل می‌شوند. در کل، این کامپوزیت‌ها از یک زمینه آلیاژ فلزی نرم و افزودنی تقویت‌کننده که اغلب یک ماده سرامیکی است تشکیل می‌شود. این ماده سرامیکی به منظور تقویت و تأمین استحکام و سختی مناسب به زمینه اضافه می‌شود. در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی از آلیاژها و فلزات مختلف نظیر آلیاژهای مس، آلومینیوم، روی، تیتانیوم، سوپر آلیاژهای پایه نیکل و ... استفاده می‌شود.

کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌توانند به عنوان مواد اصطکاکی مانند لنت ترمز استفاده شوند. این مواد دارای عملکرد پایدارتر بیولوژیکی و عمر طولانی در محیط‌های با دمای بالا بوده و همچنین

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: zdashakoyan@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

متالورژی پودر در قسمت‌های موتور، سیستم انتقال قدرت (گیربکس) و شاسی بکار می‌روند [۷].

با وجود تمام مزایایی که برای روش متالورژی پودر وجود دارد، این روش همانند سایر فرایندهای تولید، دارای معایبی نیز می‌باشد که از آن جمله می‌توان به احتمال تجمع ذرات فاز تقویت‌کننده و توزیع غیر یکنواخت آن‌ها در ساختار کامپوزیت اشاره کرد، که این امر باعث عدم یکنواختی در خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده و باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود [۸ و ۹]. از جمله عیوب دیگر در قطعات تولید شده به روش متالورژی پودر، وجود تخلخل در قطعه می‌باشد که باعث کاهش قابل توجهی از هدایت حرارتی می‌شود [۱۰]. البته با اعمال کار مکانیکی روی این نوع مواد می‌توان ساختار ماده را بهبود داد [۱۱].

در فرایندهای شکل‌دهی، کار سختی باعث افزایش استحکام و سختی فلز در اثر کار مکانیکی می‌شود. در مقابل این افزایش استحکام، فلز قابلیت چکش‌خواری<sup>۱</sup> خود را از دست می‌دهد؛ لذا این محدودیت باعث می‌شود که افزایش استحکام بیشتر، در فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود. به همین دلیل است که امکان دستیابی به استحکام موردنظر، با شکل‌دهی فلزات توسط بسیاری از فرایندهای شکل‌دهی صنعتی وجود ندارند [۳]. همچنین در روش‌های مرسوم، به دلیل آسیب دیدن دستگاه‌ها، تجهیزات و محدودیت ابزار، امکان اعمال مقادیر زیاد کرنش وجود ندارد. یکی از روش‌های ایجاد کرنش-های بالا در مواد، استفاده از روش تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۲</sup> (SPD) می‌باشد. تغییر شکل پلاستیک شدید به روش‌هایی گفته می‌شود که با استفاده از آن‌ها می‌توان کار مکانیکی به نسبت زیادی را به فلز اعمال کرد، بدون آنکه فلز دچار شکست و ترک‌خوردگی شود. از واژه «شدید» به این دلیل استفاده می‌شود که در این روش، تغییر شکل شدیدتری در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم شکل‌دهی به ساختار ماده اعمال می‌شود [۴].

در دو دهه اخیر مواد پلی‌کریستال با دانه‌بندی بسیار ریز<sup>۳</sup> (UFG) در حدود نانومتر و یا چند صد نانومتر به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه، به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۱۱]. خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی تحت تأثیر فاکتورهای متعددی می‌باشند که اندازه متوسط دانه در تعیین این خواص نقش بسزایی دارد. به طور کلی در دماهای پایین، استحکام مربوط به اندازه دانه از طریق رابطه هال-پچ<sup>۴</sup> (رابطه ۱) نشان می‌دهد که کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام مواد می‌شود [۱۲].

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $\sigma_0$  مقاومت شبکه،  $d$  اندازه دانه و  $K_y$  ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد.

یکی از رویکردهای جدید برای تولید مواد نانوکریستال و مواد با دانه‌های بسیار ریز، اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی نمونه اولیه با دانه‌های درشت می‌باشد. در این روش، با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه طی چندین مرحله، اندازه دانه‌های آن تا مقیاس

نانومتری کاهش می‌یابد و این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی ماده می‌شود [۱۳ و ۱۴]. از آنجایی که تغییرات ابعادی ماده می‌تواند مانعی در مقابل میزان کرنش اعمالی باشد، اکثر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید به نحوی طراحی شده‌اند که ابعاد نمونه در حین فرآیند تغییر نمی‌کند. یکی از مهم‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، پرس در کانال زاویه‌دار مساوی<sup>۵</sup> (ECAP) است. فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی روشی مؤثر جهت تولید مواد با ساختار بسیار ریز دانه بوده تا از این طریق خواص مکانیکی و فیزیکی آن‌ها را به طور چشم‌گیری بهبود بخشد [۹]. البته قابل ذکر است که لزوماً کاهش اندازه دانه طی فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی باعث افزایش استحکام ماده نمی‌شود؛ عواملی مانند چگالی نایجایی‌ها که در طی فرآیند تغییر می‌کنند نیز بر افزایش استحکام تأثیرگذار می‌باشند [۱۱]. از دیگر مزایای این فرآیند می‌توان به دستیابی حجم بسیار قابل توجه از دانه‌های بسیار ریز درون مواد پلی‌کریستال اشاره نمود [۱۵ و ۱۶].

یکنواختی ساختار و خواص مکانیکی ماده‌ی تولید شده به روش پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، به میزان و نحوه توزیع کرنش پلاستیک در حین سیلان ماده درون کانال‌های قالب بستگی دارد. از مهم‌ترین عواملی که بر این کمیت‌ها تأثیر گذارند، می‌توان به زاویه‌ی برخورد کانال‌ها و زاویه‌ی انحنای خارجی قالب اشاره نمود [۱۱].

در کامپوزیت مس- آهن تولید شده به روش متالورژی پودر با افزایش میزان آهن، تخلخل و چگالی نمونه‌ها تغییر چندانی نمی‌کند، در حالی که سختی آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد [۱۷]. افزودن عناصر آلیاژی همانند نیکل و مولیبدن باعث افزایش سختی می‌گردد که می‌تواند با افزایش دانسیته و کاهش تخلخل در قطعات متالورژی پودر همراه شده و نتایج مناسبی برای قطعات با تیراز بالا در صنعت ارائه نماید [۱۸ و ۱۹].

بر اساس مطالعات انجام شده، تاکنون تحقیقی در راستای ترکیب فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی و متالورژی پودر صورت نپذیرفته است. هدف اصلی این تحقیق تولید کامپوزیت مس- آهن در درصدهای مختلف به روش متالورژی پودر برای نخستین بار و مطالعه تجربی خصوصیات مکانیکی آن بعد از فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی می‌باشد.

## ۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق از پودر مس اتمیزه و پودر آهن اتمیزه با اندازه دانه-ی زیر ۶۳ میکرون و پودر نیکل با اندازه دانه‌ی ۳ میکرون استفاده شد. نمونه‌ها پس از اختلاط مکانیکی (طبق نسبت‌های مذکور در جدول ۱)، در داخل قالب استوانه‌ای به قطر ۱۴ mm و طول ۱۱۵ mm ریخته شده و با فشار ۴۵۰ MPa فشرده‌سازی شدند (تصویر قالب در پیوست مقاله آورده شده است). نمونه‌های فشرده شده، در داخل کوره تونلی به طول ۸ متر و به مدت یک ساعت در دمای ۹۲۰ °C تف جوشی شدند. نمونه‌های تف‌جوشی شده جهت قرار گرفتن تحت فرآیند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، با مقطع گرد به قطر ۱۲ mm و طول تقریبی ۴۸ mm

<sup>1</sup> Ductility

<sup>2</sup> Severe Plastic Deformation

<sup>3</sup> Ultrafine grained

<sup>4</sup> Hall-Petch

<sup>5</sup> Equal-channel angular pressing

مقطع در راستای عمود بر محور فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی از وسط نمونه برش داده شده و به وسیله عملیات سنباده‌زنی و پولیش-کاری مکانیکی با توجه به روش‌های استاندارد متالوگرافی آماده شدند. پس از پولیش کاری نمونه‌ها، از محلول کالینگ طبق استاندارد ASTM E407 No.95 برای اچ کردن نمونه‌ها استفاده شده است. ترکیبات این محلول شامل ۱۰۰ ml الکل اتانول، ۱۰۰ ml هیدروکلریک اسید و ۵ gr کلرید مس است. اندازه متوسط دانه توسط نرم افزار MIP4 از روی تصاویر میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد.

چگالی نمونه قبل از تف جوشی و بعد از تف جوشی و بعد از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، با استفاده از فرمول حجم و چگالی و با استفاده از غوطه‌وری در آب طبق قانون ارشمیدس و استاندارد STM (B328-96, MPIFestmethod 42, ISO 2738) محاسبه شد.

برای انجام آزمایش سختی، نمونه‌های پرس نشده در کانال زاویه‌دار مساوی و پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی در هر مرحله، مطابق شکل ۱، به وسیله اره کمانه برش داده شد و تا شماره ۲۰۰۰ سنباده-زنی و سپس پولیش کاری شد. سختی‌سنجی با نیروی ۰/۵ نیوتن و مدت اعمال ۱۵ ثانیه به روش ویکرز بر روی نقاط نشان داده شده در شکل ۱ در سه نقطه انجام گرفت. برای هر نمونه میانگین بدست آمده از اندازه‌گیری در ۳ نقطه به عنوان مقدار سختی متوسط لحاظ شد.

به منظور بررسی تشکیل فازهای احتمالی در داخل نمونه‌ها پس از طی فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، دستگاه پراش اشعه ایکس مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از دستگاه پراش اشعه ایکس ساخت شرکت SIEMENS مدل D5000-40Kv-30mA با لامپ Cu و طول موج  $K\alpha=1.5406$  متعلق به سازمان زمین‌شناسی تبریز استفاده شد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- میکروسختی سنجی

مقدار بدست آمده از اندازه‌گیری سختی در سه نقطه (در اطراف هر نقطه چندین بار عمل سختی سنجی تکرار شد) که محل آنها در شکل ۱ نشان داده شده در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده گردید که سختی نمونه‌ها از جانب مرکز قطعه به طرف سطح قطعه در حال افزایش می‌باشد و همچنین با افزودن آهن به میزان ۱۰ درصد وزنی به مس، سختی به میزان تقریبی ۲ برابر افزایش یافته است. با افزودن نیکل به میزان ۳٪ به ساختار کامپوزیت، مشاهده می‌شود که سختی نمونه تغییر چندانی نکرده است اما نمونه‌ی حاصل، قابلیت فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی تا سه مرحله را پیدا کرده و سختی آن تا حدود ۲۴۷ Hv رسیده است.

توسط عملیات ماشین‌کاری، آماده‌سازی شدند. فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی با استفاده از دستگاه پرس آزمون مدل HSML-05 در دمای اتاق و با سرعت ثابت ۰/۰۵ mm/s انجام شد. نمونه‌ها درون یک قالب دو تکه ساخته شده از فولاد سمانته AISI 1.7131 که توسط یک رینگ بیرونی جهت جلوگیری از باز شدن قالب، مهار شده بود و دارای دو کانال هم مقطع با قطر ۱۲ mm و زاویه برخورد ۹۰° و انحنای خارجی ۲۰°، تحت فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفتند (تصویر قالب در پیوست مقاله آورده شده است). درصد اختلاط پودرها برای تهیه نمونه‌های تحقیق که به روش متالورژی پودر ساخته شده‌اند، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- درصد اختلاط پودرها جهت تهیه نمونه تحقیق

شماره نمونه	درصد مس	درصد آهن	درصد نیکل	درصد استتارات	درصد گرافیت	وزن (گرم)
۱	۱۰۰	۰	۰	۰/۷	۰/۸	۵۸
۲	۹۰	۱۰	۰	۰/۷	۰/۸	۵۸
۳	۸۹	۱۰	۱	۰/۷	۰/۸	۵۸
۴	۸۷	۱۰	۳	۰/۷	۰/۸	۵۸

با اعمال فشار برگشتی در حین فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، بدلیل اعمال فشار هیدرواستاتیک به نمونه و یکنواخت‌تر شدن کرنش در نمونه، به ساختاری ریزدانه‌تر و بدون ترک می‌توان دست یافت. در این تحقیق نیز به منظور اعمال فشار برگشتی به نمونه، از قطعه آلومینیومی سری ۶۰۰۰ به قطر ۱۲ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی-متر که توسط عملیات ماشین‌کاری آماده شده بود، استفاده گردید [۱۴].

پس از هر مرحله انجام فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، در صورت وجود پلیسه در نمونه آزمایش و تغییر مقطع احتمالی در آن، فرایند آماده سازی اعم از پلیسه‌گیری و سنباده زنی روی نمونه انجام شده و بدون چرخش و تغییر جهت، دوباره در کانال ورودی قرار گرفت به عبارت دیگر، نمونه آزمایش همان گونه که در مرتبه اول وارد کانال قالب برای طی فرایند پرس شده بود در مرتبه دوم پرس نیز با همان جهت به داخل کانال هدایت شد. دلیل کاهش جرم در نمونه مس-آن-نیکل بعد از عملیات پرس (جدول ۳) نیز همین پلیسه‌گیری بین پاس‌های پرسکاری است.

همچنین در این تحقیق از اسپری تفلون، مارک Soudal، ساخت کشور بلژیک به عنوان ماده روانکار استفاده شده است. جهت بررسی ریزساختار ماده، قبل و بعد از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت Leitz و میکروسکوپ الکترونی روبشی مارک MIRA3 FEG-SEM ساخت کمپانی Tescan ساخت کشور چک مورد استفاده قرار گرفت (به دلیل استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری برای تحلیل اندازه دانه‌ها در نرم افزار MIP4، این تصاویر در متن مقاله استفاده شد و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در پیوست مقاله در دسترس است). جهت بررسی سختی ماده قبل و بعد از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی از دستگاه میکروسختی سنجی SCTMC micro Vickers hardness tester model HV-1000z با دقت ۰/۵ ± ویکرز استفاده شد. برای این منظور یک



شکل ۱- نحوه برش عرضی نمونه‌های پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی و الگوی نقاط سختی سنجی

جدول ۲- مقدار سختی بدست آمده برای نمونه‌های تحقیق

شماره	مشخصات نمونه	سختی		
		سختی در	سختی در	سختی میانگین
		نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳
۱	مس پرس نشده	۶۲/۶۸	۶۵/۷	۶۴/۹۳
۲	کامپوزیت مس- آهن پرس نشده	۱۲۷/۱	۱۲۹/۱	۱۲۸/۸۳
۳	کامپوزیت مس- آهن یک پاس پرس شده	۱۶۳/۷	۱۶۵/۱	۱۷۱/۲
۴	کامپوزیت مس- آهن-۱٪ نیکل پرس نشده	۱۰۷/۳	۱۱۵	۱۱۶/۵
۵	کامپوزیت مس- آهن-۱٪ نیکل یک پاس پرس شده	۱۵۸/۷	۱۶۷/۳	۱۷۵/۳۶
۶	کامپوزیت مس- آهن-۱٪ نیکل دو پاس پرس شده	۱۶۹/۴	۱۸۹/۹	۱۹۷/۸۳
۷	کامپوزیت مس- آهن-۳٪ نیکل پرس نشده	۱۱۰/۵	۱۲۳/۳	۱۲۲/۰۳
۸	کامپوزیت مس- آهن-۳٪ نیکل یک پاس پرس شده	۱۴۱/۵	۱۵۳/۳	۱۵۴/۲۳
۹	کامپوزیت مس- آهن-۳٪ نیکل دو پاس پرس شده	۱۷۳/۸	۱۷۵/۳	۱۷۵/۳
۱۰	کامپوزیت مس- آهن-۳٪ نیکل سه پاس پرس شده	۱۸۹/۹	۲۴۹	۲۴۷/۲۳

مس-آهن-۳ درصد نیکل قبل و بعد از تف جوشی و بعد از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، با استفاده از فرمول حجم و چگالی و با استفاده از غوطه‌وری در آب طبق قانون ارشمیدس محاسبه شد.

در جدول ۳، داده‌های حاصل از بررسی چگالی، آورده شده است. با توجه به چگالی بدست آمده از نمونه‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش عناصر آلیاژی و اعمال فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، چگالی، افزایش یافته است. همچنین با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که عمل فشردن در گام اول و تف جوشی در مرحله بعدی سبب افزایش چگالی شده است. حضور تخلخل در قطعات یکی از عوامل مؤثر بر چگالی می‌باشد. افزودن نیکل به دلیل تشکیل محلول جامد با مس و یا آهن، باعث کاهش تخلخل‌ها در نمونه شده است. روابط لازم برای محاسبه چگالی تئوری در رابطه‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است:

$$\rho_{Fe-Cu} = (0.1 \times \rho_{Fe}) + (0.9 \times \rho_{Cu}) \quad (2)$$

$$\rho_{Fe-Cu-Ni} = (0.1 \times \rho_{Fe}) + (0.87 \times \rho_{Cu}) + (0.03 \times \rho_{Ni}) \quad (3)$$

جدول ۳- چگالی محاسبه شده برای نمونه‌های حداقل ترکیب و حداکثر ترکیب

مشخصات نمونه	جرم gr	حجم Cm <sup>3</sup>	چگالی محاسبه شده	
			چگالی نظری	چگالی درصد
مس-آهن قبل از زینتر	۵۸	۷/۳۸	۷/۸۶	۸/۸۴۴
مس-آهن بعد از زینتر	۵۸	۷/۱	۸/۲	۸/۸۴۴
مس-آهن بعد از پرس	۵۸	۶/۹	۸/۴	۸/۸۴۴
آهن-نیکل قبل از زینتر	۵۸	۷/۴	۷/۹	۸/۸۴۲
آهن-نیکل بعد از زینتر	۵۸	۷/۱	۸/۲	۸/۸۴۲
مس-آهن-نیکل بعد از پرس	۴۰/۵	۴/۷	۸/۶	۸/۸۴۲

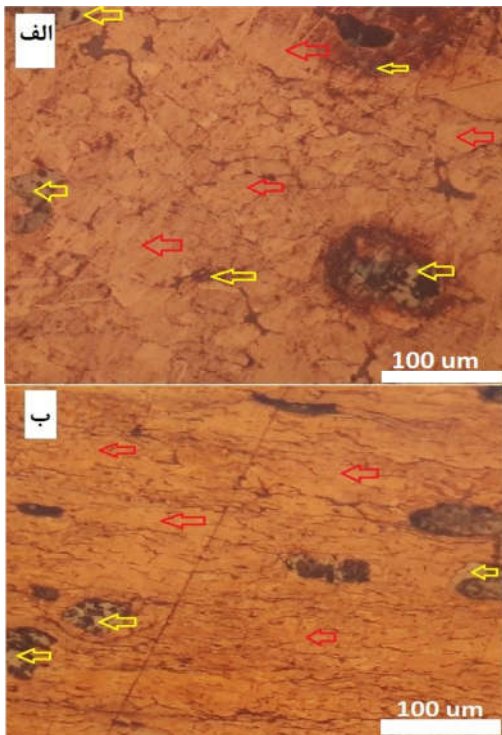
### ۳-۳- ریز ساختار

شکل ۲، تصویر کامپوزیت مس-آهن و شکل ۳ تصویر همان کامپوزیت پس از یک مرحله پرس در کانال زاویه‌دار مساوی را نشان می‌دهد (فلش‌های قرمز رنگ نشان دهنده مس، فلش‌های زرد رنگ نشان دهنده آهن و فلش‌های آبی رنگ نشان دهنده تخلخل می‌باشند). با مقایسه این دو تصویر با استفاده از نرم افزار MIP4، مشاهده می‌شود

### ۲-۳- چگالی

برای بررسی تخلخل‌های نمونه‌ها، چگالی نمونه‌های مس-آهن و

پرس در کانال زاویه‌دار مساوی یک پاسه و دوپاسه به ترتیب در اشکال (۵ الف) و (۵ ب) نشان داده شده است (فلش‌های قرمز رنگ نشان دهنده مس و فلش‌های زرد رنگ نشان دهنده آهن می‌باشند). نتایج بدست آمده از نرم افزار MIP4 بیانگر کاهش متوسط اندازه دانه‌ها با افزایش تعداد پاس فرایند می‌باشد.



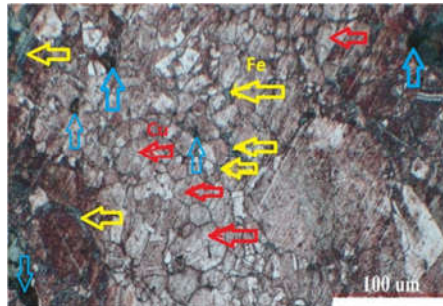
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت مس-آهن ۱ درصد نیکل با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر: (الف) یک پاس پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی (ب) دو پاس پرس شده در کانال زاویه دار مساوی. فلش های قرمز رنگ در شکل معرف فاز مس و زرد رنگ نیز نشان دهنده فاز آهن می باشند.



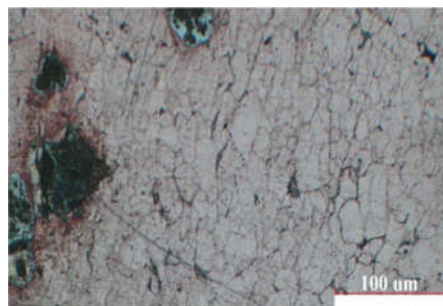
شکل ۶- تصویر کامپوزیت مس-آهن-۱ درصد نیکل دو پاس پرس شده در داخل قالب زاویه‌دار مساوی

شکل ۶، کامپوزیت مس-آهن-۱ درصد نیکل پس از طی دو پاس فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی در داخل قالب را نشان می‌دهد.

که ساختار نمونه پس از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، معادل ۶۵٪ ریزتر شده است. اما به دلیل شکست نمونه در پاس اول، (تصویر آن در شکل ۴ آمده است) امکان تجدید فرایند برای نمونه، امکان پذیر نشد. به منظور حل این مشکل، پودر نیکل به مقدار ۱ درصد وزنی به مخلوط کامپوزیت اضافه شده و نتایج حاصل بررسی شد.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت مس-آهن پرس نشده در کانال زاویه‌دار مساوی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر. فلش‌های زرد، قرمز و آبی به ترتیب نشان دهنده فازهای آهن مس و نیکل می‌باشند.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت مس-آهن یک پاس پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر



شکل ۴- تصویر کامپوزیت مس-آهن یک پاس پرس شده در داخل قالب با کانال زاویه‌دار مساوی

اگرچه با افزودن نیکل به میزان ۱ درصد وزنی به ترکیب کامپوزیت مس-آهن، تغییر چندانی در سختی نمونه‌ها، ایجاد نشد ولی امکان انجام فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی تا پاس دوم فراهم و در این مرحله سختی میانگین نمونه تا حدود ۱۹۸ Hv افزایش یافت. تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر در شرایط

هرچند شکل نهایی نمونه در اثر افزودن نیکل تا ۱ درصد وزن، بهبود یافته اما ترک‌هایی در روی نمونه، پس از پاس دوم، مشاهده می‌شود. به منظور بهبود بیشتر خواص نمونه‌ی تحقیق، با افزودن نیکل به میزان ۳ درصد وزنی به ترکیب کامپوزیت، نتایج حاصل دوباره مورد بررسی قرار گرفت. با افزودن نیکل به میزان ۳ درصد وزنی به ترکیب کامپوزیت و حصول نمونه مس-آهن-۳درصد نیکل، مشاهده می‌شود که سختی کامپوزیت در مقایسه با کامپوزیت مس-آهن، تغییر چندانی نکرده است. در صورتی که، امکان انجام فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی تا پاس سوم حاصل گردید. این امر باعث افزایش سختی نمونه به حدود ۲۴۷ Hv شده و شکل نهایی بدون ترک و عیوب سطحی برای نمونه، حاصل گشت. در شکل ۷، تصویر نمونه‌ی مس-آهن-۳درصد نیکل نشان داده شده است.



شکل ۷- تصویر کامپوزیت مس-آهن ۳ درصد نیکل پس از سه پاس پرس در کانال زاویه‌دار مساوی

شکل ۸، تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری برای کامپوزیت مس-آهن با ۳ درصد نیکل را نشان می‌دهد (فلش‌های قرمز رنگ نشان دهنده مس، فلش‌های زرد رنگ نشان دهنده آهن و فلش‌های آبی رنگ نشان دهنده تخلخل می‌باشند). تصویر (الف) نمونه مس-آهن-۳ درصد نیکل بدون فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، تصویر (ب) نمونه مس-آهن-۳ درصد نیکل بعد از یک پاس پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، تصویر (ج) نمونه مس-آهن-۳ درصد نیکل بعد از دو پاس پرس در کانال زاویه‌دار مساوی و تصویر (د) نمونه بعد از سه پاس پرس در کانال زاویه‌دار مساوی را نشان می‌دهد. با مقایسه تصاویر شکل ۸ معلوم می‌گردد که با افزایش تعداد پاس فرایند، به دلیل اعمال کرنش بیشتر روی نمونه، اندازه تخلخل در ساختار، کاهش می‌یابد و ساختار نمونه ریزدانه‌تر می‌شود. اندازه متوسط دانه‌ی نمونه‌ی مس-آهن-۳ درصد نیکل حدود  $14 \mu\text{m}$  می‌باشد که پس از پاس اول به حدود  $10 \mu\text{m}$  و نهایتاً پس از پاس سوم به حدود  $5 \mu\text{m}$  کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده از چگالی نمونه‌ها نیز کاهش تخلخل را تأیید می‌کند. در این نمونه، با افزایش مقدار نیکل در ساختار مشاهده می‌شود که قابلیت کار سرد در نمونه افزایش یافته و نمونه بعد از سه پاس فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی هنوز هم پایدار بوده و هیچ ترکی بر روی نمونه وجود ندارد.



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ نوری از کامپوزیت مس-آهن-۳ درصد نیکل پرس شده و نشده در کانال زاویه‌دار مساوی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابری:

(الف) پرس نشده، (ب) یک پاس، (ج) دو پاس، (د) سه پاس

برای نمونه‌ها معلوم گردید که حداقل سختی در مرکز نمونه‌ها و حداکثر سختی در سطح نمونه‌ها می‌باشد.

کمترین سختی در نمونه مس-آهن ۱-درصد نیکل که تحت فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی قرار نگرفته است با مقدار میانگین  $116/5 \text{ Hv}$  و بیشترین سختی در نمونه مس-آهن ۳ درصد نیکل که ۳ مرتبه تحت فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی قرار گرفته است با مقدار میانگین  $247/23 \text{ Hv}$  به دست آمده است. که معادل ۲۱۲٪ افزایش سختی می‌باشد.

با افزایش عناصر آلیاژی و افزایش تعداد پاس فرایند، افزایش چگالی در نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

با توجه به تحلیل تصاویر میکروسکوپی، ساختار نمونه مس-آهن قبل از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی درشت دانه بوده که پس از عملیات پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، ساختار آن ریزدانه شد. اندازه دانه برای نمونه مس-آهن پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی در مقایسه با نمونه مس-آهن پرس نشده در کانال زاویه‌دار مساوی، به میزان ۶۵٪ کاهش یافت.

با افزایش تعداد پاس فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی به دلیل اعمال کرنش بیشتر به نمونه، فضای خالی موجود در ساختار کاهش می‌یابد و ساختار نمونه ریزدانه‌تر می‌شود. نتایج بدست آمده از چگالی نیز کاهش تخلخل در ساختار نمونه را تصدیق می‌کنند.

با افزودن پودر نیکل به ترکیب نمونه‌ها و تولید نمونه مس-آهن-نیکل، فرایندپذیری نمونه‌ها تا سه پاس امکان‌پذیر شد.

با بررسی گراف‌های به دست آمده از دستگاه پراش اشعه ایکس مشاهده شد که در اثر عملیات پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، هیچگونه فازی جدید در ساختار نمونه‌ها به وجود نیامده است.

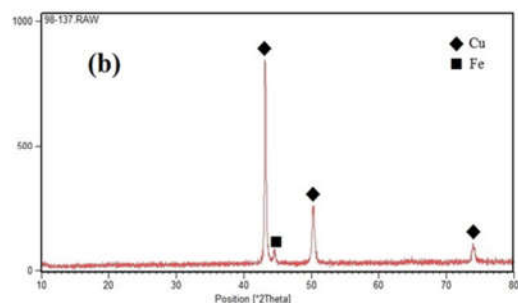
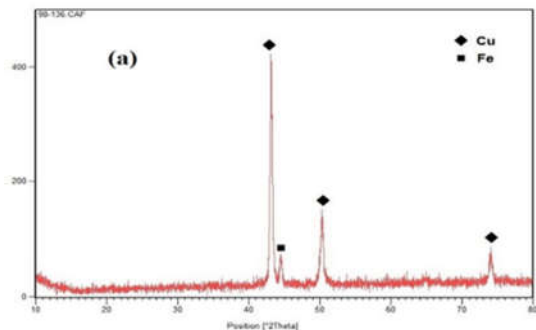
## ۵- سپاسگزاری

از شرکت متالورژی پودر آذر واقع در شهر تبریز، بابت همکاری در این پژوهش، صمیمانه قدردانی می‌شود.

## ۶- مراجع

- [1] Zhou, H., Yao, P., Xiao, Y., Fan, K., Zhang, Z., Gong, T., Zhao, L., Deng, M., Liu, C. and Ling, P., Friction and Wear Maps of Copper Metal Matrix Composites with Different Iron Volume Content. *Tribology International*, Vol. 132, pp. 199-210, 2019.
- [2] Xiao, Y., Zhang, Z., Yao, P., Fan, K., Zhou, H., Gong, T., Zhao, L. and Deng, M., Mechanical and Tribological Behaviors of Copper Metal Matrix Composites for Brake Pads Used in High-Speed Trains. *Tribology International*, Vol. 119, pp. 585-592, 2018.
- [3] Su, L., Gao, F., Han, X., Fu, R. and Zhang, E., Tribological Behavior of Copper-Graphite Powder Third Body on Copper-Based Friction Materials. *Tribology Letters*, Vol. 60, No. 2, pp. 1-12, 2015.
- [4] Peng, T., Yan, Q., Li, G. and Zhang, X., The Influence of Cu/Fe Ratio on the Tribological Behavior of Brake Friction Materials. *Tribology Letters*, Vol. 66, No. 1, pp. 1-12, 2018.
- [5] Xiong, X., Chen, J., Yao, P., Li, S. and Huang, B., Friction and Wear Behaviors and Mechanisms of Fe and SiO<sub>2</sub> in Cu-Based P/M Friction Materials. *Wear*, Vol. 262, No. 9-10, pp. 1182-1186, 2007.
- [6] Ranjbar, K., The Effect of Niobium Oxide (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) on the Sintering Behavior of Composite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>. *Advanced Processes in Materials Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-24, 2018.

به منظور بررسی تشکیل فازهای احتمالی در ساختار نمونه‌ها، پس از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی، از نتایج پراش اشعه ایکس استفاده شده است. به دلیل مشابه بودن ساختار نمونه‌ها و به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها، یک نمونه با حداقل خواص و یک نمونه با حداکثر خواص مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تصویر پراش اشعه ایکس برای نمونه مس-آهن ۳ درصد نیکل پرس نشده در کانال زاویه‌دار مساوی و نمونه مس-آهن ۳ درصد نیکل سه پاس پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی مورد بررسی قرار گرفت. گراف‌های استخراج شده توسط دستگاه پراش اشعه ایکس که در شکل ۹ قابل مشاهده است با استفاده از نرم افزار X'Pert HighScore تحلیل شد. با توجه به همسانی گراف‌ها در شکل ۹ مشخص می‌شود که هیچگونه فاز احتمالی در ساختار نمونه‌ها تشکیل نشده است.



شکل ۹ - تصویر پراش اشعه ایکس برای نمونه مس-آهن ۳ درصد نیکل: (a) پرس نشده در کانال زاویه‌دار مساوی و (b) پرس شده در کانال زاویه‌دار مساوی

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کامپوزیت مس-آهن در درصدهای مختلف به روش متالورژی پودر تولید گردید و تحت فرایند پرس در کانال زاویه‌دار مساوی قرار گرفت. نتایج بررسی تجربی نمونه‌های تولید شده و آنالیزهای صورت گرفته را می‌توان به شکل زیر خلاصه نمود:

مقدار سختی برای مس خالص تولید شده به روش متالورژی پودر  $65 \text{ Hv}$  می‌باشد که با افزودن آهن به  $129 \text{ Hv}$  افزایش یافت. به عبارتی با افزودن ۱۰٪ وزنی آهن به ترکیب مس، مقدار سختی در حدود ۲ برابر افزایش یافته است که معادل افزایش ۱۰۰٪ در سختی نمونه مس خالص می‌باشد. همچنین با توجه به داده‌های بدست آمده از سختی

- [7] www.patron.group.
- [8] Wong-Angel, W. D., Téllez-Jurado, L., Chávez-Alcalá, J. F., Chavira-Martínez, E. and Verduzco-Cedeño, V. F., Effect of Copper on the Mechanical Properties of Alloys Formed by Powder Metallurgy. *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 12-18, 2014.
- [9] German, R. M., *Powder Metallurgy Science. Metal Powder Industries Federation*, 105 College Rd. E, Princeton, N. J. 08540, U. S. A, 1984. 279, 1984.
- [10] Vincent, C., Silvain, J.-F., Heintz, J.-M. and Chandra, N., Effect of Porosity on the Thermal Conductivity of Copper Processed by Powder Metallurgy. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 73, No. 3, pp. 499-504, 2012.
- [11] Moshksar, M. M., Afsari, A. and Ahmadi, S. Y., Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Commercially Pure Copper Deformed Severely by Equal Channel Angular Pressing. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 257-266, 2015.
- [12] Nejadseyfi, O., Shokuhfar, A. and Moodi, V., Segmentation of Copper Alloys Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 8, pp. 2571-2580, 2015.
- [13] Wei, W., Guang, C., Jingtiao, W. and Guoliang, C., Microstructure and Tensile Properties of Ultrafine Grained Copper Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Rare Metals*, Vol. 25, No. 6, pp. 697-703, 2006.
- [14] Wang, Y. L., Lapovok, R., Wang, J. T., Qi, Y. S. and Estrin, Y., Thermal Behavior of Copper Processed by Ecap with and without Back Pressure. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 628, pp. 21-29, 2015.
- [15] Valiev, R. Z. and Langdon, T. G., Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement. *Progress in materials science*, Vol. 51, No. 7, pp. 881-981, 2006.
- [16] Horita, Z., Fujinami, T. and Langdon, T. G., The Potential for Scaling Ecap: Effect of Sample Size on Grain Refinement and Mechanical Properties. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 318, No. 1-2, pp. 34-41, 2001.
- [17] Fu, R., Gao, F. and Song, B. Y., Effects of Fe on Friction and Wear Properties of Cu-Based Friction Aterial. in *Proceeding of Trans Tech Publ*, pp. 1830-1833 .
- [۱۸] قندی، آ.، آرین، مسیحیان صناعی، بررسی تاثیر عناصر نیکل، مولیبدن، مس و کربن بر روی سختی، دانسیته و خواص ریزساختاری قطعات فولادی ساخته شده به کمک روش متالورژی پودر. فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، د.د. ش. ۲، ص ۲۵-۳۰، ۱۳۸۷.
- [19] Semel, F., Properties of Parts Made from an Ancorbond Processed Carbon--Nickel-Steel Powder Mix(Fn-0208). 1989 *Advances in Powder Metallurgy*, Vol. 1, pp. 9-23, 1989.
- [20] Lowe, T. C. and Valiev, R. Z., Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation, *Springer Science & Business Media*, 2000.
- [21] Bean, J. J. and McKenna, K. P., Origin of Differences in the Excess Volume of Copper and Nickel Grain Boundaries. *Acta Materialia*, Vol. 110, pp. 246-257, 2016.
- [22] Rana, G., Dhiman, P., Kumar, A., Vo, D. V. N., Sharma, G., Sharma, S. and Naushad, M., Recent Advances on Nickel Nano-Ferrite: A Review on Processing Techniques, Properties and Diverse Applications. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 175, pp. 182-208, 2021.
- [23] Miyamoto, G. and Furuahara, T., Interaction of Alloying Elements with Migrating Ferrite/Austenite Interface. *Isij International*, Vol. 60, No. 12, pp. 2942-2953, 2020.