

# اثر افزودن ذرات کاربید تنگستن بر روی تخلخل، ریزساختار، میزان سختی و رفتار سایشی فولادهای متالورژی پودر

علی کامل<sup>۱</sup>، حمید سازگاران<sup>۲\*</sup> و مسعود پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده علوم مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

(h.sazegaran@qiet.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

## چکیده

در این پژوهش، فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی) به روش متالورژی پودر تولید شدند. میزان چگالی و درصد تخلخل، مشخصه‌های ریزساختاری، میزان سختی و رفتار سایشی نمونه‌های تولیدی ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ذرات کاربید تنگستن تا ۱/۵ درصد وزنی، میزان چگالی افزایش و درصد تخلخل کاهش می‌یابد. البته، محدوده چگالی اندازه‌گیری شده بین ۷/۱۵ تا ۷/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و گستره درصد تخلخل بین ۱۴/۰۱ تا ۱۶/۳۴ است. مطالعات میکروسکوپی بر روی زمینه فولادی نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی فسفید آهن منجر به تشکیل یک فاز غنی از فسفر در مرزها و بهبود یکنواختی توزیع ذرات کاربید تنگستن شد. این امر کاهش ۲۸/۷ درصدی تخلخل (از ۱۱/۵ درصد به ۸/۲ درصد) و افزایش ۲/۷ درصدی چگالی (از ۷/۱۵ به ۷/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) را به همراه داشت. علاوه بر این، نمونه فولاد مرکب حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن به حداکثر میزان سختی (۳۲/۶ HRB) دست یافت که نشان‌دهنده افزایش ۶۸ درصدی نسبت به نمونه فولادی بدون تقویت‌کننده است. نتایج آزمون سایش پین روی دیسک نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن به عنوان میزان بهینه تقویت‌کننده، منجر به بهبود ۴۴/۶ و ۴۲/۲ درصدی مقاومت سایشی به ترتیب در مسافت‌های ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متر شده است، در حالی که درصدهای بالاتر (۱، ۵ درصد) به دلیل پدیده کلوخه‌شدگی موجب افت مقاومت به سایش می‌شود.

کلمات کلیدی: آزمون سایش، فرآیند متالورژی پودر، کاربید تنگستن، میزان سختی، درصد تخلخل

## The Effect of Tungsten Carbide Particle Addition on the Porosity, Microstructure, Hardness, and Wear Characteristics of Powder Metallurgy Steels

Ali Kamel<sup>1</sup>, Hamid Sazegaran<sup>2\*</sup>, Masoud Pour<sup>3</sup>

M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

<sup>2</sup> Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Science, Quchan University of Technology, Quchan, Iran (h.sazegaran@qiet.ac.ir)

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

## Abstract

In this work, tungsten carbide particle reinforced steel composites (0, 0.5, 1, and 1.5 wt.%) were fabricated through powder metallurgy route. The density, porosity content, microstructural characteristics, hardness, and wear behavior

of the produced samples were studied. The results indicated that with an increase in tungsten carbide particles up to 1.5 wt.%, the density increases and the porosity decreases. However, the measured density range was between 7.15 and 7.34 g/cm<sup>3</sup>, and the porosity range was between 14.01% and 16.34%. Microscopic studies on the steel matrix revealed that the addition of 1 wt.% iron phosphide led to the formation of a phosphorus-rich phase at the boundaries of agglomerated iron particles and improved the uniformity of tungsten carbide particle distribution. This resulted in a 28.7% reduction in porosity (from 11.5% to 8.2%) and a 2.7% increase in density (from 7.15 to 7.34 g/cm<sup>3</sup>). Furthermore, the steel composite sample containing 1 wt.% tungsten carbide achieved the maximum hardness value (32.6 HRB), representing a 68% increase compared to the unreinforced steel sample. Pin-on-disk wear test results demonstrated that the addition of 1 wt.% tungsten carbide as the optimal reinforcement content led to a 44.6% and 42.2% improvement in wear resistance at distances of 100 and 1000 meters, respectively. In contrast, higher percentages (1.5 wt.%) caused a decline in wear resistance due to the clustering phenomenon.

**Keywords:** Pin on disk test, Powder metallurgy, Tungsten carbide, Hardness, Porosity percentage

## ۱- مقدمه

همان طور که می‌دانیم، فولادها دسته‌ای بسیار مهم از آلیاژهای مهندسی هستند که قابلیت استفاده در بسیاری از کاربردهای ساختاری و عملکردی را دارند. در این میان، فولادهای تولیدشده به روش متالورژی پودر به دلیل مزایای ذاتی از جمله تولید نزدیک به شکل نهایی، راندمان بالای تولید و همچنین قابلیت ایجاد ریزساختارهای همگن و کنترل‌شده، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلفی همانند خودروسازی و ابزارسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. با این وجود، کاربرد این فولادها در شرایط سایشی شدید و بارهای دینامیکی بالا، به دلیل مقاومت به سایش و سختی ناکافی در مقایسه با فولادهای کار شده مشابه، با محدودیت‌های جدی مواجه هستند [۲]. برای غلبه بر این چالش جدی، رویکرد توسعه مواد مرکب زمینه فولادی با تقویت‌کننده‌های سرامیکی، اغلب به عنوان یک راه‌حل مفید و مؤثر در نظر گرفته می‌شود. در بین ذرات سرامیک، ذرات کاربید تنگستن به دلیل برخورداری از سختی بسیار بالا (در حدود ۲۲۰۰ تا ۲۴۰۰ ویکرز)، ضریب کشسانی زیاد، پایداری ترمودینامیکی درون زمینه فولادی و ضریب انبساط حرارتی تقریباً نزدیک به آهن، به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب به عنوان تقویت‌کننده برای بهبود همزمان ویژگی‌های مکانیکی و تریبولوژیکی محصول نهایی شناخته می‌شوند [۳ و ۴].

باید خاطر نشان کرد که پژوهش‌های گسترده‌ای به بررسی نقش کاربیدهای مختلف در مواد مرکب زمینه فولادی پرداخته‌اند. به عنوان مثال، گارسیا و همکارانش [۵] و ژانگ و همکارانش [۶] به ترتیب نشان دادند که افزودن کاربیدهای مختلف می‌تواند سختی و مقاومت به سایش فولادهای زینترشده را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با این حال، لی و همکارانش [۷] در یک مطالعه تطبیقی مهم نشان دادند که مواد مرکب تقویت‌شده با کاربید تنگستن در مقایسه با نمونه‌های حاوی کاربید تیتانیوم، از چقرمگی شکست بالاتری برخوردارند که ناشی از مکانیزم‌های جذب انرژی کارآمدتر در فصل مشترک ذره با زمینه است. این برهمکنش در فصل مشترک و پایداری آن در طول فرآیند تف‌جوشی، عاملی کلیدی در این دسته از مواد مهندسی محسوب می‌شود. مولر و اشمیت [۸] و ایوانوف و همکارانش [۹] گزارش داده‌اند که عوامل تولید (همانند دما، زمان و اتمسفر تف‌جوشی) بر روی نحوه

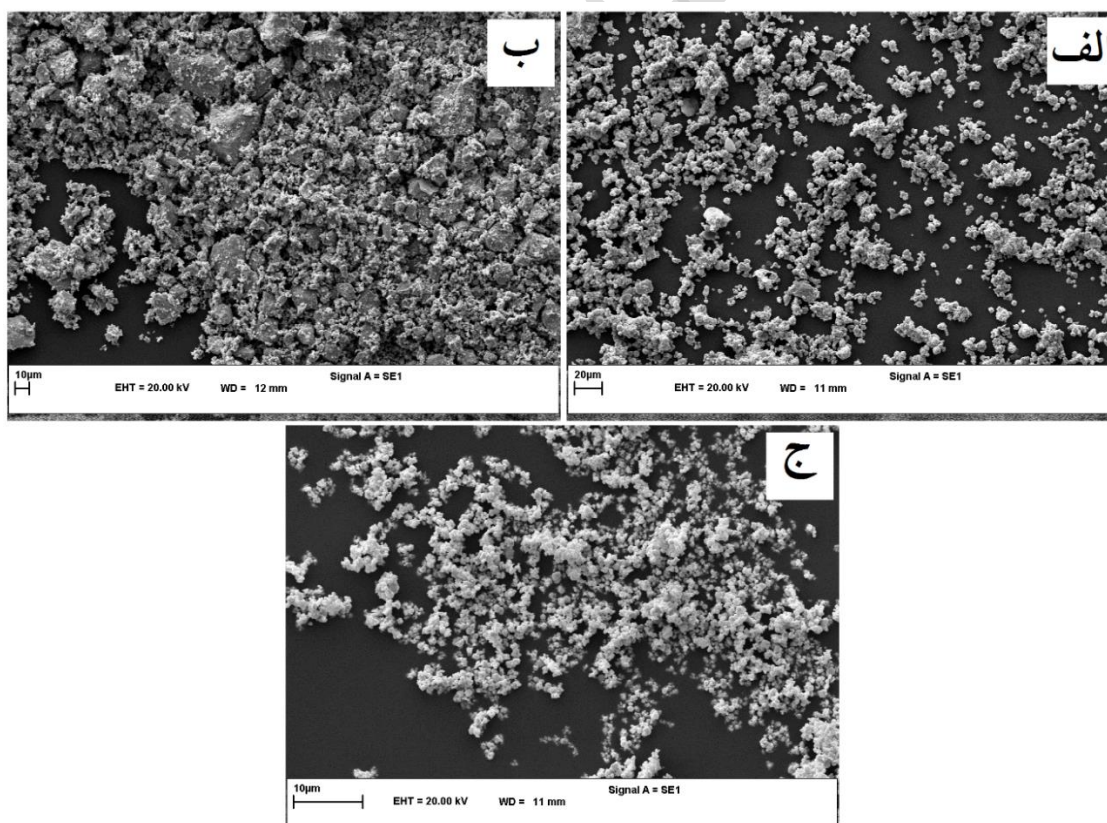
اتصال ذرات به یکدیگر، ریزساختار، تشکیل فازهای بین‌فلزی در مرزدانه‌ها و در نهایت، بر چگالی نهایی و درصد تخلخل ماده مرکب تأثیر تعیین‌کننده‌ای دارند. علاوه بر این، براون و دیویس [۱۰] به سازوکارهای سایشی در مواد مرکب زمینه فلزی پرداخته‌اند و نقش ذرات سخت در تغییر سازوکار غالب سایش را تشریح نموده‌اند.

در ادامه، پژوهش‌های دیگری به بررسی جنبه‌های خاص‌تر این مواد مرکب پرداخته‌اند. لی و ژانگ [۱۱] به بهینه‌سازی پارامترهای آسیاب کاری مکانیکی برای دستیابی به توزیع همگن ذرات کاربید تنگستن در زمینه فولادی تأکید نموده‌اند. از سوی دیگر، پارک و همکارانش [۱۲] و ژائو و همکارانش [۱۳] به ترتیب، تأثیر دمای تفجوشی بر رفتار سایشی و نحوه انتشار ترک در این مواد مرکب را مورد مطالعه قرار داده‌اند. ابوالعزیز و همکارانش [۱۴] نیز رابطه همبستگی مستقیمی بین یکنواختی ریزساختار و مقاومت به سایش در فولادهای تفجوشی شده گزارش کرده‌اند. در حوزه رفتار مکانیکی، چویی و همکارانش [۱۵] توسعه یک فولاد ابزار جدید تقویت شده با کاربید تنگستن را تشریح نموده‌اند و این در حالی است که کومار و پاتل [۱۶] به تحلیل تنش‌های پسماند در این مواد پرداخته‌اند. از طرف دیگر، جنبه‌های نوآورانه در ساخت و تولید نیز مورد توجه بوده است. اویانگ و همکارانش [۱۷] یک روش جدید برای ساخت این مواد مرکب ارائه داده‌اند و نیلسن [۱۸] به طور ویژه، اثر اندازه و توزیع ذرات کاربید را بر سختی محصول مرکب مورد بررسی قرار داده است. مطالعات پیشرفته‌تر نیز به موضوعاتی همچون رفتار اکسیداسیون در دمای بالا توسط پرز و همکارانش [۱۹] و مدل‌سازی عددی رفتار سایشی توسط ساتو و تاناکا [۲۰] پرداخته‌اند. وورستر و همکارانش [۲۱]، اثر محتوای کربن بر ریزساختار، شو و ژائو [۲۲] ویژگی‌های میکرومکانیکی فصل مشترک، و یانگ و همکارانش [۲۳] مقایسه سایش از نوع ساینده و فرسایشی را بررسی نموده‌اند. در نهایت، ژانگ و لی [۲۴]، به مقاومت در برابر خستگی حرارتی و ژو و همکارانش [۲۵] از یک رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین برای طراحی بهینه این مواد مرکب و سازگاران و همکارانش [۲۶] به بررسی رفتار فشاری فوم‌های فولادی تقویت شده با کاربید تنگستن پرداخته‌اند. البته، با وجود این حجم از پژوهش متنوع، شکاف موجود در درک جامع از ارتباط بین درصد ذرات با میزان تخلخل، ریزساختار نهایی و ویژگی‌های کاربردی همچنان محسوس است. اگرچه این پژوهش‌ها نقش مثبت کاربید تنگستن را تأیید می‌کنند، اما مطالعه اثر درصد ذرات کاربید تنگستن بر درصد تخلخل، یکپارچگی ریزساختاری و ارتباط آن با میزان سختی و ویژگی‌های سایشی هنوز به طور کامل مورد کاوش قرار نگرفته است و هدف اصلی این پژوهش، تولید و ارزیابی این مشخصه‌ها در فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی) است.

## ۲- مواد و روش انجام آزمون‌ها

### ۲-۱- مواد و فرآیند تولید

در این پژوهش، برای تولید نمونه‌های مواد مرکب زمینه فولادی تقویت‌شده با ذرات کاربید تنگستن به روش متالورژی پودری، از پودر آهن (حدود ۹۹/۷ درصد خلوص)، ۰/۵ درصد وزنی پودر گرافیت (یا گرافیت با ۹۹/۹۹ درصد خلوص) به عنوان منبع کربن، ۱ درصد وزنی پودر فسفید آهن (حاوی ۱۳ درصد وزنی فسفر و ۸۷ درصد وزنی آهن) به منظور تشکیل فاز یوتکتیک مایع در دمای تفجوشی و پودر کاربید تنگستن (۰، ۰/۰۵، ۱، و ۱/۵ درصد وزنی) به عنوان فاز تقویت‌کننده سرامیکی استفاده شد. قابل توجه است که فسفید آهن به همه مخلوط‌های پودری اضافه شده است. شایان ذکر است که به همه مخلوط‌های پودری، ۱ درصد وزنی استئارات روی به عنوان روان‌کار حالت جامد اضافه گردید تا تراکم‌پذیری مخلوط‌ها در طی مرحله فشرده‌سازی بهبود یابد [۲۷ و ۲۸]. شکل ۱، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات آهن، فسفید و کاربید تنگستن مورد استفاده را نشان می‌دهد. پودر آهن به روش اتمیزه آبی تولید شده است و ذرات نامنظم با میانگین اندازه ۴۲/۶ میکرون دارد (شکل ۱-الف). این در حالی است که ذرات فسفید آهن اغلب دارای اشکال نسبتاً منظم با میانگین اندازه ۲۲/۴ میکرون هستند (شکل ۱-ب). علاوه بر این، ذرات کاربید آهن که به روش آسیاکاری تولید شده‌اند، دارای اشکال تقریباً منظم با میانگین اندازه ۲/۳ میکرون می‌باشند (شکل ۱-ج). قابل ذکر است که همه پودرها از شرکت متالورژی پودر خراسان تهیه شده‌اند.



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) ذرات آهن، (ب) ذرات فسفید آهن و (ج) ذرات کاربید تنگستن.

مراحل ساخت نمونه‌های مرکب شامل توزین پودرها، اختلاط، فشردن و تفجوشی است. در اولین مرحله، فرآیند توزین پودرها توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام شد. در ادامه، فرآیند مخلوط کردن پودرها به منظور ایجاد مخلوط‌های کاملاً یکنواخت با استفاده از یک مخلوط‌کن چرخشی با سرعت دوران ۳۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۲۵ دقیقه صورت گرفت. فرآیندهای توزین و اختلاط طوری انجام شد که مخلوط‌های پودری تهیه شده به ترتیب دارای ۰، ۵/۰، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن هستند. سپس، فرآیند فشردن برای ساخت نمونه‌های خام اولیه توسط یک پرس هیدرولیک ۳۰ تن و درون قالب فولاد AISI 1045 انجام شد. باید در نظر داشت که قطر داخلی قالب ۱۲ میلی‌متر است و در نتیجه، قطر نمونه‌های تولیدی ۱۲ میلی‌متر خواهد بود. به منظور ایجاد یکنواختی در نمونه‌های خام اولیه، فشردن از دو طرف صورت گرفت. در پایان، نمونه‌های خام تولید شده توسط یک کوره مخصوص متالورژی پودر تفجوشی شدند.

## ۲-۲- تعیین چگالی و درصد تخلخل

به منظور آماده‌سازی نهایی نمونه‌های مرکب زمینه فولادی، عملیات پرداخت سطحی، برش وایرکات و اندازه‌گیری مشخصه‌های فیزیکی با دقت بالا انجام گرفت. فرآیند پرداخت سطحی توسط یک دستگاه پرداخت استوانه‌ای دوار مجهز به صفحات ساینده ویژه انجام شد. این عملیات با سرعت دورانی ۱۵۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه به منظور حذف کامل ناهمواری‌های حاشیه‌ای و رسیدن به ابعاد دقیق صورت پذیرفت. در مرحله بعد، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات (مدل DK7735) برش داده شده و به ابعاد نهایی با قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۸ میلی‌متر رسیدند. دقت بالای این فرآیند برش، امکان دستیابی به سطوح کاملاً صاف و عاری از هرگونه اعوجاج را فراهم نمود. برای تعیین مشخصه‌های فیزیکی نمونه‌ها، چگالی و درصد تخلخل با به کارگیری روش آنالیز ابعادی و توزین اندازه‌گیری شد. در این راستا از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم به منظور اندازه‌گیری جرم نمونه‌ها استفاده گردید. چگالی نمونه‌ها بر اساس معادله (۱) و درصد تخلخل آن‌ها مطابق معادله (۲) محاسبه شد [۲۸ و ۲۹]. شایان ذکر است که برای محاسبات تخلخل، چگالی نظری فولاد کاملاً متراکم معادل ۷/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد که به عنوان مبنای محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$$P\% = \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{Bulk}} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

که در معادلات فوق،  $\rho$  میزان چگالی،  $m$  جرم،  $V$  حجم،  $P\%$  درصد تخلخل و  $\rho_{Bulk}$  چگالی جامد یا چگالی فولاد کاملاً متراکم (برابر با ۷/۸۵ g/cm<sup>3</sup>) است.

### ۳-۲- مطالعات میکروسکوپی

به منظور بررسی و تحلیل ریزساختار نمونه‌های مرکب زمینه فولادی تقویت‌شده با ذرات کاربید تنگستن، از دو روش میکروسکوپی نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بهره گرفته شد. در ادامه، شیوه آماده‌سازی نمونه‌ها برای ارزیابی‌های میکروسکوپی تشریح شده است. در گام اول، مقاطع مورد نظر از نمونه‌های تفجوشی‌شده با استفاده از دستگاه وایرکات در جهت عمود بر محور نمونه‌ها برش داده شدند. سپس، فرآیندهای متالوگرافی شامل مانت گرم، سمباده‌زنی با استفاده از کاغذهای ساینده با درشتی‌های مختلف (از ۱۸۰ تا ۱۲۰۰ گرید) و پولیش کاری با محلول الماسه حاوی ذرات آلومینای ۱ میکرومتر انجام پذیرفت. سپس، به منظور آشکارسازی مرزخانه‌ها و فازهای موجود در ریزساختار، عملیات حکاکی یا اچ کردن نمونه‌ها با استفاده از محلول نایتال (۲ درصد اسید نیتریک در اتانول) انجام شد. ترتیب مطالعات میکروسکوپی بدین صورت بود که ابتدا بررسی‌های اولیه و شناسایی نواحی مورد نظر توسط میکروسکوپ نوری صورت گرفت و سپس، ارزیابی‌های دقیق‌تر با بزرگنمایی‌های بالاتر و عمق میدان و وضوح بیشتر به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

### ۴-۲- سختی‌سنجی و آزمون سایش

برای تعیین رفتار مکانیکی مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن از اندازه‌گیری میزان سختی و تعیین رفتار سایشی استفاده شد. سختی‌سنجی نمونه‌های تفجوشی شده مطابق با استاندارد راکول B و با استفاده از دستگاه سختی‌سنج مدل HBRVU-187.5 انجام پذیرفت. در این آزمون، از یک فرورونده الماسی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه به عنوان دندانگذار استفاده شد و بار اعمالی معادل ۶۰ کیلوگرم انتخاب گردید. فرآیند کالیبراسیون و تنظیم اولیه دستگاه با قرار دادن فرورونده در وضعیت بدون بار و تنظیم فاصله آن از سطح نمونه تا رسیدن نشانگر روی صفحه نمایش به مقدار ۱۰۰ انجام شد. پس از تنظیمات اولیه، بار اصلی اعمال شد و به مدت ۱۰ ثانیه حفظ گردید. مقدار نهایی سختی مستقیماً از صفحه نمایشگر دستگاه قرائت شد. برای اطمینان از قابلیت تکرارپذیری و صحت نتایج، بر روی هر نمونه پنج اندازه‌گیری در نقاط مختلف صورت گرفت و مقادیر به دست آمده از این آزمایش‌ها گزارش شد.

در ادامه، ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌های مرکب زمینه فولادی تفجوشی شده با استفاده از آزمون سایش پین روی دیسک<sup>۱</sup> مطابق با استاندارد ASTM G99 انجام شد [۳۰]. دستگاه مورد استفاده، برای این منظور طراحی و بهینه‌سازی شده است. باید خاطرنشان کرد که سطح تماس تمامی نمونه‌ها پیش از آزمایش به منظور حصول اطمینان از یکنواختی نتایج، با استفاده از کاغذ سنباده شماره ۸۰۰ صیقل داده شد. عوامل اصلی آزمایش به این

<sup>1</sup> Pin on disk

صورت تنظیم شدند که مسافت سایش برابر با ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متر (یا تعداد دور مورد نیاز به ترتیب ۷۴۹ و ۷۴۹۰ دور)، شعاع متوسط مسیر سایش برابر با ۴/۲۵ میلی‌متر و محیط مسیر سایش برابر با ۱۳/۳ میلی‌متر انتخاب شد. شایان توجه است که برای اطمینان از تکرارپذیری و صحت نتایج، میانگین کاهش وزن حاصل از سه بار آزمایش سایش پین روی دیسک برای هر نمونه مرکب زمینه فولادی به عنوان معیار نهایی مقاومت به سایش در نظر گرفته شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- میزان چگالی و درصد تخلخل

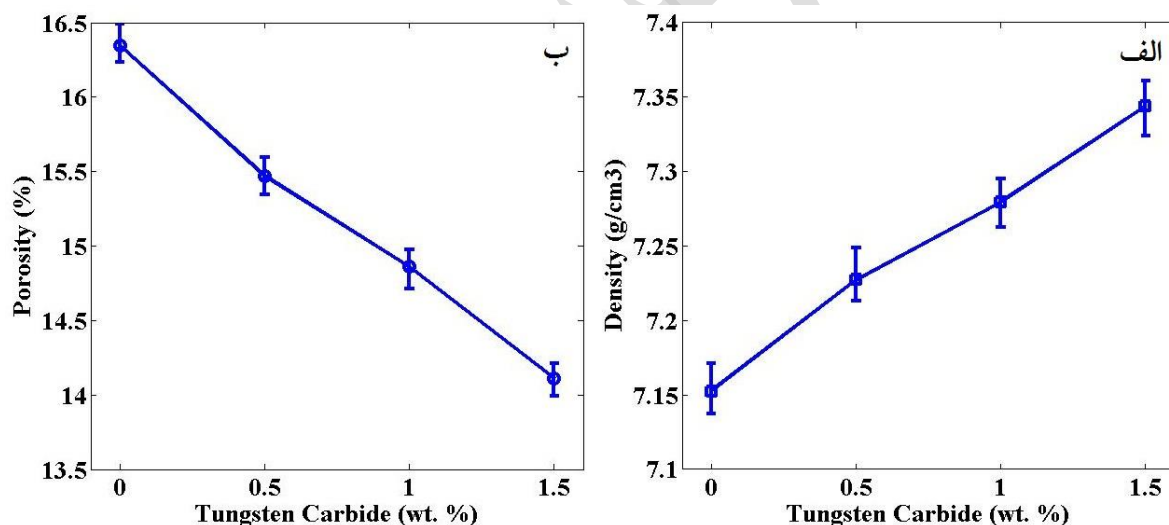
می‌دانیم که میزان چگالی و درصد تخلخل از عوامل کلیدی و تعیین‌کننده‌ای هستند که به طور مستقیم بر ویژگی‌های مکانیکی فولادهای مرکب از جمله مقدار استحکام، ضریب کشسانی، مشخصه‌های رفتار شکست و حتی پاسخ دینامیکی-ارتعاشی این مواد تأثیر بسزایی دارد [۳۱]. در حقیقت، تخلخل به عنوان یک عامل اصلی در ساختار فولادهای مرکب عمل می‌نماید و توزیع، اندازه و شکل حفره‌ها می‌تواند رفتار مکانیکی کاملاً متفاوتی را در این مواد به ارمغان آورد. البته، درک رابطه بین این عوامل فیزیکی و ترکیب شیمیایی برای طراحی و بهینه‌سازی فولادهای مرکب با کارایی بالا امری ضروری محسوب می‌شود. در شکل ۲، میزان چگالی و درصد تخلخل فولادهای مرکب تفجوشی شده بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن افزودنی نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزودن ذرات کاربید تنگستن بر میزان چگالی و درصد تخلخل فولادهای تقویت‌شده به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر است.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های چگالی سنجی نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی ذرات کاربید تنگستن از ۰ تا ۱/۵ درصد وزنی، چگالی نمونه‌ها از ۷/۱۵ تا ۷/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش معناداری یافته است. این پدیده را می‌توان از چند دیدگاه مورد مطالعه قرار داد. از یک طرف، حضور ذرات تقویت‌کننده کاربید تنگستن به عنوان فاز سخت و مستحکم در زمینه فولادی، با ایجاد مراکز هسته‌زایی جدید، فرآیند تفجوشی ذرات به یکدیگر را تسهیل می‌نماید و موجب کاهش ریزحفرات باز و افزایش یکنواختی در ریزساختار می‌شود. از طرف دیگر، تشابه نسبتاً مناسب ضریب انبساط حرارتی ذرات کاربید تنگستن با زمینه فولادی از ایجاد تنش‌های حرارتی مخرب در طی فرآیند سرد کردن جلوگیری می‌کند و موجب بهبود یکپارچگی ریزساختار می‌گردد. سازوکار دیگر مؤثر در افزایش میزان چگالی فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن، نقش کاتالیزوری ذرات در فرآیند تفجوشی حالت جامد است. این ذرات با ایجاد مرزهای فعال، نفوذ اتمی را تسهیل می‌کنند و موجب پر شدن حفرات بین دانه‌های پودر آهن می‌شوند. علاوه بر این، تشکیل فازهای بین‌فلزی در فصل مشترک ذرات تقویت‌کننده

و زمینه فولادی منجر به ایجاد پیوندهای مستحکم‌تر و در نتیجه، کاهش درصد تخلخل در قسمت مرزدانه‌ها می‌شود [۳۲].

باید خاطرنشان کرد که در درصدهای بالاتر کاربید تنگستن (بیش از ۲ درصد)، کاهش جزئی در میزان چگالی گزارش شده است که می‌تواند ناشی از پدیده کلوخه‌شدگی ذرات و تجمع آن‌ها در مرز دانه‌ها در فولادهای مرکب باشد. این پدیده‌ها منجر به ایجاد تمرکز تنش و افزایش تخلخل در مرزدانه‌ها می‌شوند. علاوه بر این، در درصدهای بالای کاربید تنگستن، احتمال تشکیل فازهای ترد بین‌فلزی نیز افزایش چشم‌گیری از خود نشان می‌دهد که می‌تواند از فرآیند تف‌جوشی و اتصال ذرات به یکدیگر به صورت کامل ممانعت نماید [۳۳].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد تخلخل نمونه‌های مرکب تف‌جوشی شده نیز مطابق با انتظار، روند معکوسی با میزان چگالی از خود نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۲-ب، نمونه فولاد مرکب بدون کاربید تنگستن بیشترین تخلخل (۱۶/۳۴ درصد) و نمونه فولاد مرکب حاوی ۱/۵ درصد تقویت‌کننده کمترین تخلخل (۱۴/۰۱ درصد) را دارند. البته با افزایش کاربید تنگستن، درصد تخلخل کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد. جالب توجه است که توزیع تخلخل در نمونه‌های حاوی کاربید تنگستن یکنواخت‌تر است و حفرات عمدتاً به شکل بسته و کروی مشاهده می‌شوند و این در حالی است که در نمونه‌های فاقد تقویت‌کننده، حفرات به صورت باز و نامنظم توزیع شده بودند.



شکل ۲- الف) میزان چگالی و ب) درصد تخلخل فولادهای مرکب تف‌جوشی شده بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن.

## ۲-۳- مطالعات میکروسکوپی

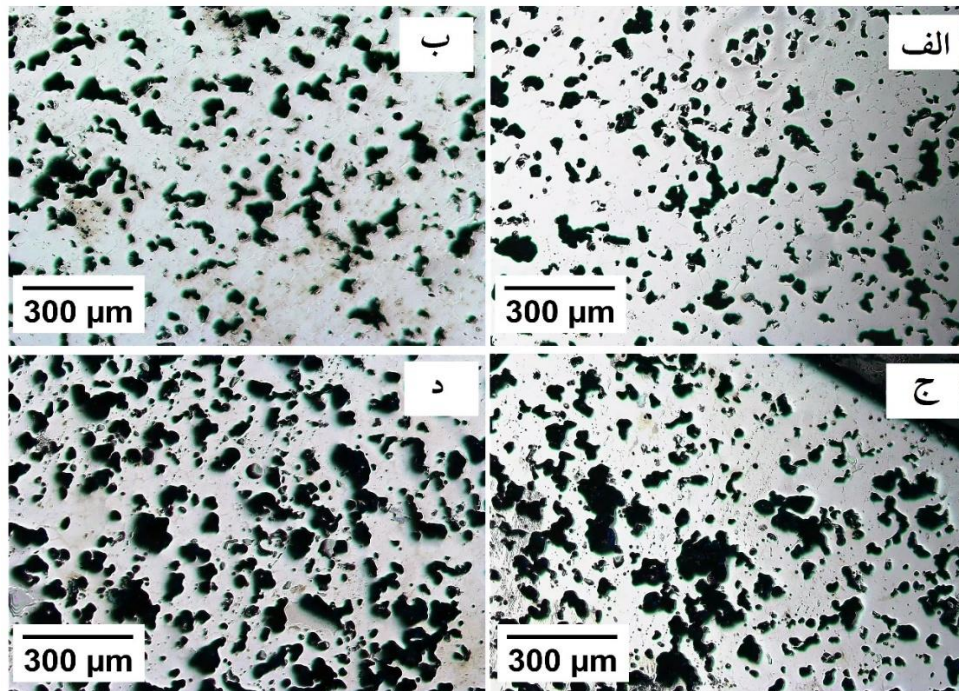
می‌دانیم که مشخصه‌های ریزساختار فولادهای تولیدشده به روش متالورژی پودر به عنوان یک عاملی تعیین‌کننده در رفتار مکانیکی نهایی در این دسته از مواد مهندسی شناخته می‌شود [۳۴]. شایان توجه است که مشخصه‌های

ریزساختاری از جمله: اندازه دانه، نحوه توزیع فازها، ریخت یا مورفولوژی تخلخل‌ها و ترکیب شیمیایی فازها، همگی تأثیر مستقیم بر روی میزان استحکام، چقرمگی و رفتار شکست در این دسته از فولادها دارند. باید خاطر نشان کرد که در فولادهای متالورژی پودر، تخلخل‌های باقیمانده پس از فرآیند تفجوشی به عنوان یک عامل کلیدی و تأثیرگذار در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند در شرایط اعمال تنش به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل نمایند و موجب تضعیف ویژگی‌های مکانیکی نهایی شوند [۳۵].

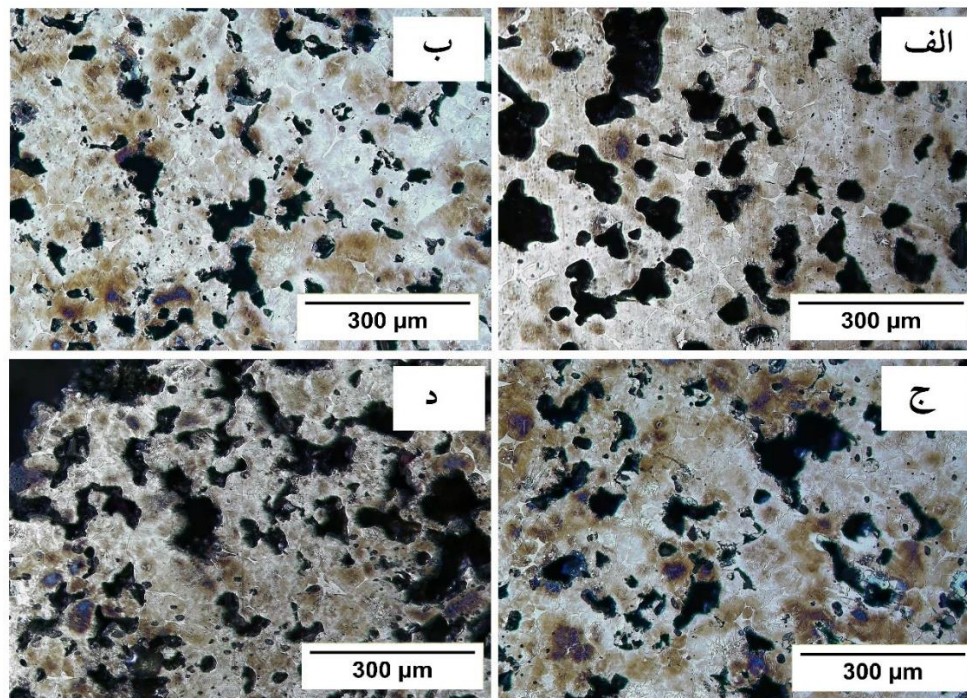
در شکل ۲، تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن قبل از حکاکی توسط نایتال نشان داده شده است. مطالعه ریزساختاری نمونه‌های تولیدشده با استفاده از میکروسکوپ نوری، توزیع و هندسه تخلخل‌های نسبتاً فراوانی که در زمینه تشکیل شده‌اند را نشان می‌دهد. این تخلخل‌ها عمدتاً دارای ریخت تقریباً شبه‌کروی با سطوح نسبتاً مسطح هستند. شکل‌گیری چنین تخلخل‌هایی را می‌توان به مشکلات فرآیند تفجوشی و همچنین توزیع ناهمگن ذرات پودر اولیه در طی فرآیند اختلاط نسبت داد. تصاویر میکروسکوپی قبل از اچ، توزیع و هندسه این تخلخل‌ها را به وضوح نشان می‌دهند، در حالی که تصاویر پس از اچ، مرز دانه‌ها و فازهای موجود در زمینه فولادی را آشکار می‌سازند. وجود تخلخل‌های با ریخت تقریباً شبه‌کروی و مسطح می‌تواند تأثیر دوگانه‌ای بر رفتار مکانیکی داشته باشد. از یک سو، لبه‌های موجود در این تخلخل‌ها می‌توانند به عنوان تمرکزدهنده تنش عمل نمایند و مقدار استحکام محصول مرکب نهایی را کاهش دهند و از سوی دیگر، توزیع یکنواخت این تخلخل‌ها در زمینه فولادی می‌تواند در جذب انرژی و بهبود چقرمگی شکست تأثیر مثبت داشته باشد [۳۶]. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد ذرات کاربید تنگستن به عنوان تقویت‌کننده سرامیکی، توزیع تخلخل‌ها یکنواخت‌تر شده، کسر سطحی آن‌ها افزایش پیدا می‌کند و اندازه متوسط آن‌ها کاهش می‌یابد که این رخدادها را می‌توان به نقش این ذرات در تسهیل فرآیند تفجوشی نسبت داد.

در شکل ۴، تصاویر میکروسکوپ نوری بعد از حکاکی از فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن نمایش داده شده است. ریزساختار در فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن که به روش متالورژی پودر تولید شده‌اند، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار مکانیکی نهایی این مواد ایفا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارزیابی‌های میکروسکوپی بعد از حکاکی با محلول نایتال، جزئیات ریزساختاری نمونه‌ها را به وضوح آشکار ساخته است. مطابق انتظار برای همه نمونه‌های فولاد مرکب که دارای حدود ۰/۵ درصد وزنی کربن هستند، تصاویر میکروسکوپی عمدتاً از ترکیبی از فریت و پرلیت تشکیل شده‌اند. در شکل ۵ که از نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن تصویربرداری شده است، ساختار لایه لایه فریت و سمانتیت سازنده پرلیت به وضوح قابل مشاهده است. با این حال، نکته قابل توجه مشاهده فاز دیگری در مرز دانه‌های پودرهای آهن اولیه است که با توجه به ترکیب شیمیایی مخلوط‌های پودری مورد استفاده، به عنوان یک فاز غنی از فسفر شناسایی گردید که البته در سایر منابع نیز گزارش شده است [۳۷]. علاوه بر این دیده می‌شود که با افزایش میزان کاربید تنگستن تا ۱ درصد

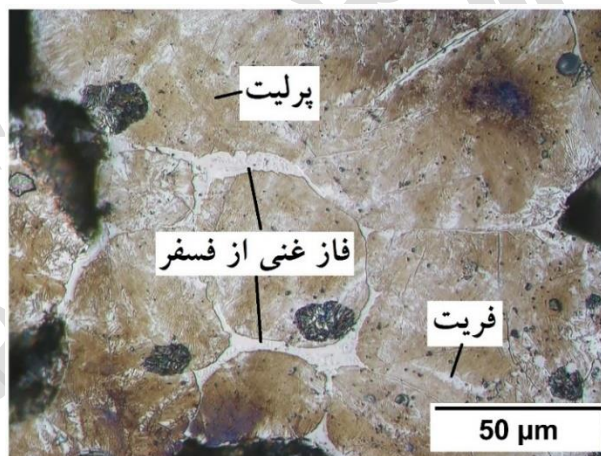
وزنی، توزیع ذرات تقویت‌کننده در زمینه نسبتاً یکنواخت است و در نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی تقویت‌کننده، توزیع ذرات تقریباً غیریکنواخت است و پدیده کلوخه‌ای شدن نیز رخ داده است.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از حکاکی توسط نایتال از نمونه‌های فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن، الف، ۰ درصد وزنی، ب) ۰/۵ درصد وزنی، ج) ۱ درصد وزنی و د) ۱/۵ درصد وزنی.



**شکل ۴-** تصاویر میکروسکوپ نوری بعد از حکاکی توسط نایتال از نمونه‌های فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن، الف، ۰ درصد وزنی، ب) ۰/۵ درصد وزنی، ج) ۱ درصد وزنی و د) ۱/۵ درصد وزنی.



**شکل ۵-** تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه فولادی مرکب تقویت شده با ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن که نمایش‌دهنده فریت، پرلیت و فاز غنی از فسفر است.

تشکیل این فاز غنی از فسفر را می‌توان مستقیماً به افزودن ۱ درصد وزنی فسفید آهن به همه مخلوط‌های پودر اولیه نسبت داد. باید در نظر داشت که فسفید آهن با نقطه ذوب نسبتاً پایین (در حدود ۱۱۶۶ درجه سانتی‌گراد) در محدوده دمای تفجوشی (۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) نقش یک تشکیل‌دهنده فاز مذاب یوتکتیکی را ایفا می‌کند. البته باید خاطرنشان کرد که این پدیده از اصول فرآیند تفجوشی حالت ذوبی تبعیت می‌نماید [۳۸]. در سازوکار

تفجوشی حالت ذوبی، با تشکیل فاز مذاب موقت در مرز ذرات پودرهای اولیه، رخداد پدیده‌های انتقال جرم به شدت تسریع می‌شود. این فاز مذاب با نفوذ در مرز دانه‌ها و ایجاد نیروهای موئینگی، باعث نزدیک‌تر شدن ذرات و تسریع فرآیند تفجوشی خواهد شد. در نهایت و با توقف فرآیند، این فاز مذاب غنی از فسفر در مرز دانه‌ها جامد می‌شود [39].

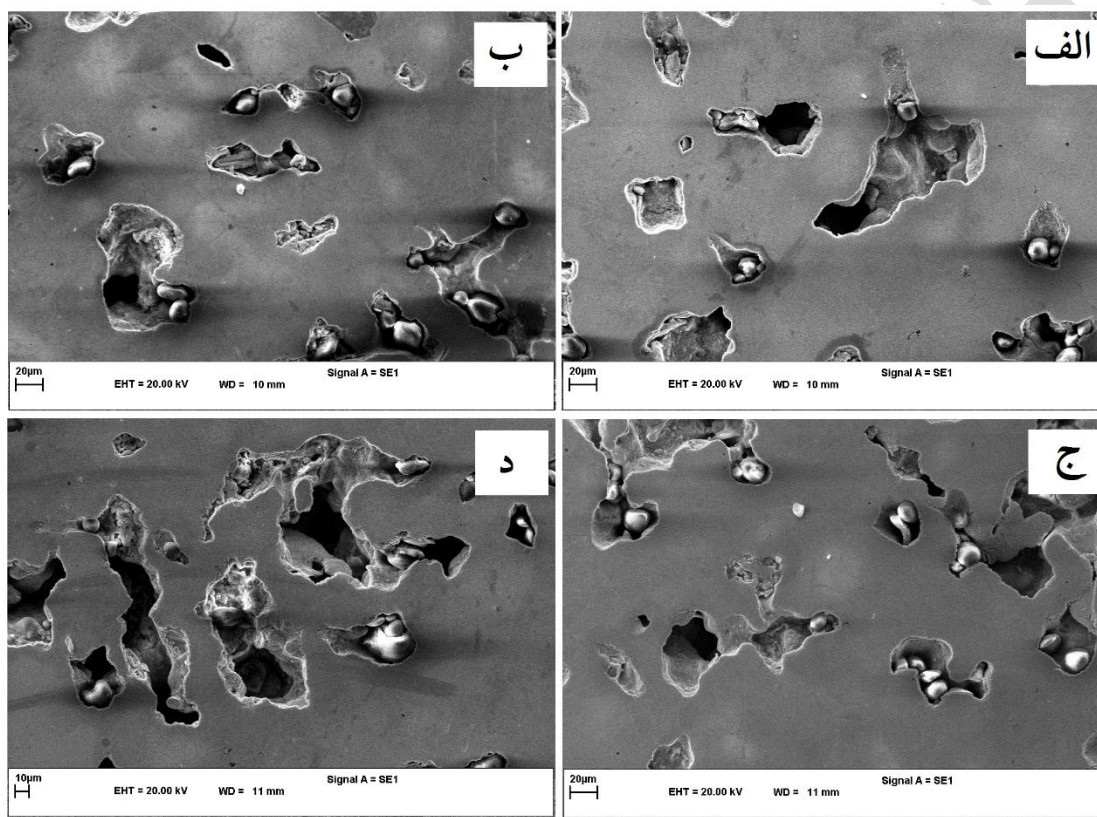
وجود این فاز در مرز دانه‌های پودرهای اولیه آهن تاثیر دوگانه‌ای بر روی ویژگی‌های مکانیکی فولاد مرکب تفجوشی شده دارد. از یک سو، با تسریع فرآیند تفجوشی، به افزایش چگالی و کاهش تخلخل کمک شایانی می‌نماید و از این رو استحکام نهایی نمونه‌ها را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، تداوم شبکه‌ای از یک فاز نسبتاً ترد و کم‌استحکام در مرز ذرات پودرهای آهن تفجوشی شده می‌تواند اغلب مسیر آسانی برای جوانه‌زنی و انتشار ترک فراهم نماید و چقرمگی شکست را تحت تاثیر منفی قرار دهد. علاوه بر این، مشاهده توزیع یکنواخت ذرات کاربید تنگستن در این زمینه چندفازی حاکی از آن است که حضور فاز مذاب، نه تنها مانعی برای توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده نبوده است، بلکه با افزایش نفوذپذیری زمینه، ممکن است به پخش بهتر این ذرات نیز کمک کرده باشد [۴۰].

در شکل ۶، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن نمایش داده شده است. تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تاثیر چشم‌گیر افزودن ذرات کاربید تنگستن بر ریزساختار زمینه فولادهای مرکب را به وضوح نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد وزنی ذرات کاربید تنگستن از ۰ به ۱/۵ درصد وزنی، حضور این ذرات تقویت‌کننده در تصاویر ریزساختاری به طور محسوسی افزایش یافته است. علاوه بر این، توزیع ذرات کاربید تنگستن در زمینه فولادی از یکنواختی قابل قبولی برخوردار است که توزیع نسبتاً یکنواخت در چنین مواد مرکبی قبلاً نیز گزارش شده است [۴].

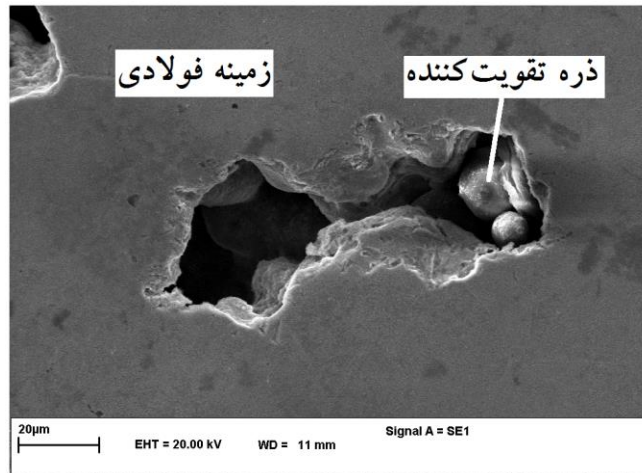
مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های مرکب نشان می‌دهد که ذرات کاربید تنگستن عمدتاً در سه ناحیه مختلف مستقر شده‌اند که شامل قرارگیری در مرز دانه‌ها، در داخل دانه‌های فریتی و در مجاورت پرلیت می‌باشد. این الگوی توزیع نشان‌دهنده اثربخشی فرآیند اختلاط مکانیکی در ایجاد پراکندگی یکنواخت ذرات است. البته می‌توان خاطر نشان کرد که مطالعات علمی نشان می‌دهد که چنین توزیع نسبتاً همگنی از ذرات سخت درون زمینه فولادی می‌تواند مانع از حرکت نابجایی‌ها شود و در نتیجه، سازکارهای تقویت‌کنندگی متعددی از جمله تقویت ارووان را فعال نماید [۲].

نکته حائز اهمیت این است که مشخصه‌های فصل مشترک بین ذرات کاربید تنگستن و زمینه فولادی نیز تاثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی فولادهای مرکب دارد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی بالا که در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است، نشان می‌دهد که هیچ گونه ترک یا جدایشی در فصل مشترک مشاهده نمی‌شود

که این موضوع حاکی از سازگاری مناسب بین فاز تقویت کننده سرامیکی و فولادی و همچنین موفقیت آمیز بودن انتخاب پارامترهای فرآیند تفجوشی است. باید در نظر داشت که پژوهش های جدید نشان می دهد که استحکام این فصل مشترک نقش تعیین کننده ای در انتقال بار از زمینه به ذرات تقویت کننده و در نهایت، بهبود ویژگی های مکانیکی دارد [۴۱]. علاوه بر این، در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده می شود که با افزایش درصد وزنی ذرات کاربید تنگستن، اندازه متوسط حفره ها کاهش می یابد و ریخت آن ها به سمت اشکال کروی تر و منظم تر سوق یافته است. رخداد این پدیده ها می تواند احتمالا ناشی از اثر ممانعت کنندگی ذرات کاربید تنگستن در برابر رشد حفره ها در حین فرآیند تفجوشی باشد.



**شکل ۶-** تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه های فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن، الف، ۰ درصد وزنی، ب) ۰/۵ درصد وزنی، ج) ۱ درصد وزنی و د) ۱/۵ درصد وزنی.



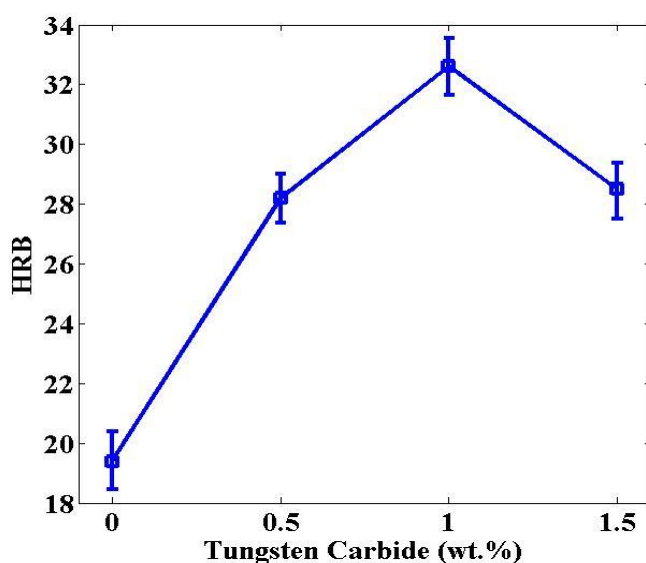
**شکل ۷-** تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فولاد مرکب حاوی ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن که تبیین کننده عدم تشکیل ترک یا جدایش در فصل مشترک ذرات تقویت کننده با زمینه فولادی است.

## ۲-۳- میزان سختی و رفتار سایشی

میزان سختی به عنوان یکی از معیارهای مهم و کلیدی برای ارزیابی میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی و همچنین مقاومت در برابر سایش، نقش تعیین کننده‌ای در کاربردهای صنعتی فولادهای تولید شده به روش متالورژی پودر ایفا می‌کند [۳۱]. این کمیت، نه تنها به طور مستقیم با مقاومت به سایش مرتبط است، بلکه می‌تواند شاخصی غیرمستقیم از استحکام تسلیم و همچنین یکپارچگی ریزساختاری فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن باشد. شایان توجه است که در اغلب مواد مرکب زمینه فولادی، اندازه‌گیری میزان سختی امکان ارزیابی کارایی فازهای تقویت کننده و کیفیت پیوند بین ذرات و زمینه را فراهم می‌سازد. مقادیر سختی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف کاربید تنگستن و روند تغییرات این عوامل در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تحلیل داده‌ها روند مشخصی از تغییرات سختی را در پاسخ به افزودن ذرات کاربید تنگستن نشان می‌دهد. افزودن ۰/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن موجب افزایش چشم گیر سختی از ۱۹/۴ به ۲۸/۲ HRB می‌شود.

این بهبود قابل توجه در سختی عمدتاً ناشی از دو سازکار تقویت است که شامل سازوکار ارووان و اختلاف ضرایب انبساط حرارتی می‌باشد. مطابق با سازوکار ارووان، ذرات سخت کاربید تنگستن به عنوان موانع غیرقابل نفوذ در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند [۳۴]. این در حالی است که در سازوکار اختلاف ضرایب انبساط حرارتی، اختلاف قابل توجه بین ضریب انبساط حرارتی ذرات سرامیکی کاربید تنگستن ( $5/5 \mu\text{m/m.K}$ ) و زمینه فولادی (در حدود  $12 \mu\text{m/m.K}$ ) منجر به ایجاد چگالی بالایی از نابجایی‌ها در اطراف ذرات می‌شود که این امر خود

موجب افزایش استحکام و سختی ماده می‌گردد [۳۵]. افزایش تدریجی میزان سختی تا حداکثر مقدار HRB ۳۲/۶ در نمونه فولادی مرکب حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن نشان‌دهنده تاثیر بهینه توزیع ذرات تقویت‌کننده در زمینه است. مطابق با شکل ۴-ج، توزیع نسبتاً یکنواخت تقویت‌کننده در فاز زمینه مشاهده می‌شود. در این ترکیب بهینه از تقویت‌کننده، ذرات کاربید تنگستن به خوبی در زمینه پراکنده شده‌اند و حداکثر کارایی در مسدود کردن مسیر حرکت نابجایی‌ها را دارند [۳۶]. بنابراین، توزیع یکنواخت تقویت‌کننده تاثیر شگرفی بر روی افزایش میزان سختی نمونه فولادی حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن داشته است. با این حال، کاهش میزان سختی به HRB ۲۸/۵ در نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن احتمالاً نشان‌دهنده وقوع پدیده کلوخه‌شدگی ذرات است. تجمع ذرات در یک موضع اغلب پدیده کلوخه‌ای شدن نامیده می‌شود. در مواد مرکب حاوی تقویت‌کننده‌های ذره‌ای، پدیده کلوخه‌ای شدن در مقادیر بسیار زیاد تقویت‌کننده مرسوم است. هنگامی که درصد ذرات از یک حد بهینه فراتر می‌رود، تمایل ذرات به تجمع و تشکیل کلوخه افزایش یافته که این پدیده می‌تواند به عنوان مراکز تمرکز تنش عمل نماید و سختی و استحکام ماده را کاهش دهد [۳۶ و ۴۴]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی تقویت‌کننده، مطابق با شکل ۴-د، پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت‌کننده موجب کاهش میزان سختی شده است.



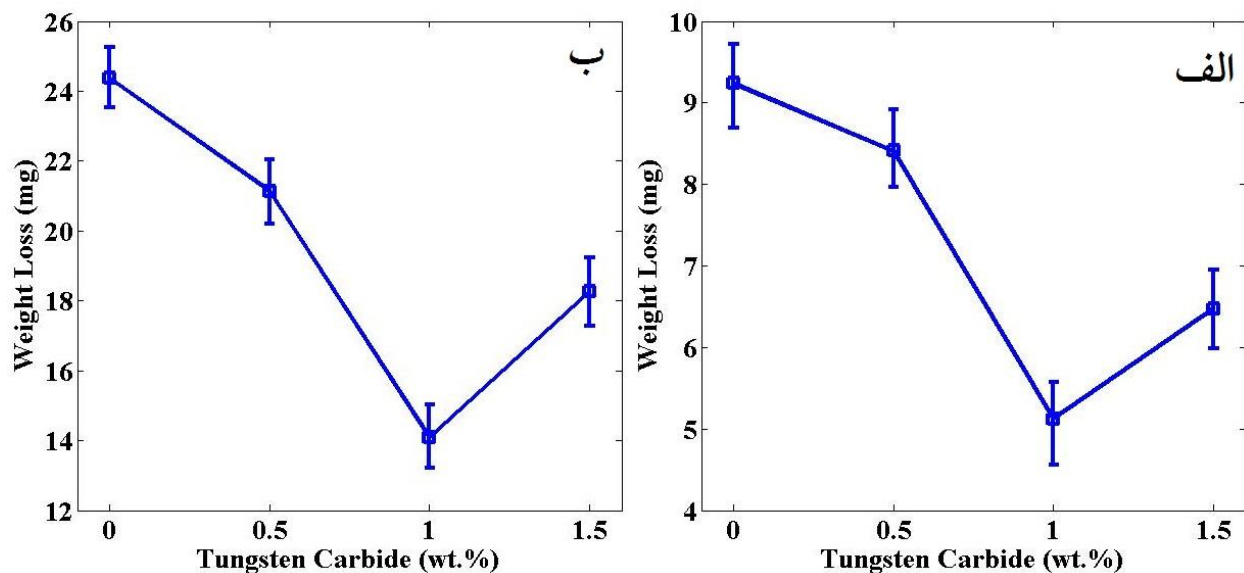
شکل ۸- نتایج آزمون سختی سنجی برای نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن.

نتایج آزمون سایش پین روی دیسک در شکل ۹ ارائه شده است. مطابق با شکل، با افزودن کاربید تنگستن تا ۱ درصد وزنی، مقاومت به سایش مواد مرکب تولید شده به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. شایان توجه است که در این نتایج، نمونه‌ها در دو مسافت ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متر مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و معیار اصلی برای سنجش مقاومت

به سایش، کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب میلی گرم پس از هر آزمایش بود. میزان کاهش وزن در مسافت‌های ۱۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر به ترتیب بین ۵/۱۲ تا ۹/۲۴ میلی گرم و ۱۴/۰۸ تا ۲۴/۳۷ میلی گرم است. البته، نمونه حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن، کمترین میزان کاهش وزن را در هر دو مسافت آزمایش از خود نشان می‌دهد. این نتیجه، تأثیر مثبت و چشم‌گیر ذرات سخت کاربید تنگستن در افزایش مقاومت به سایش ماده مرکب زمینه فولادی را ثابت می‌کند. این ذرات با ایفای نقش یک سد سخت، از ایجاد حفره‌های سایشی عمیق در سطح جلوگیری می‌کنند [۴۲].

علاوه بر این، ذرات کاربید تنگستن از دو سازوکار اصلی برای بهبود مقاومت سایشی بهره می‌برند. اول، این ذرات به عنوان موانعی فیزیکی عمل می‌نمایند و از تماس مستقیم سطح ماده مرکب با دیسک متقابل جلوگیری می‌کنند و دوم، این ذرات سخت، استحکام زمینه را افزایش می‌دهند و در نتیجه، جدایش ماده از سطح در اثر تنش‌های برشی ناشی از اصطکاک را دشوارتر می‌کنند [۴۳]. باید خاطرنشان کرد که روند داده‌ها نشان می‌دهد که بهبود مقاومت به سایش با افزایش درصد کاربید تنگستن تا ۱ درصد ادامه دارد، اما پس از آن (در نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی تقویت کننده) روند معکوس شده است. این پدیده اغلب به کلوخه‌شدگی ذرات تقویت کننده در زمینه نسبت داده می‌شود. هنگامی که درصد ذرات از یک حد بهینه فراتر می‌رود، ذرات تمایل پیدا می‌کنند تا به یکدیگر چسبیده و به جای توزیع یکنواخت، کلوخه تشکیل دهند. این کلوخه‌ها می‌توانند به راحتی از زمینه کنده شوند و نه تنها نقش حفاظتی خود را از دست بدهند، بلکه به عنوان یک عامل ساینده اضافی عمل نمایند و منجر به افزایش سایش شوند [۳]. مقایسه کاهش وزن در مسافت‌های ۱۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد که میزان سایش در تمامی نمونه‌ها با افزایش مسافت، به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از ایجاد خستگی در سطح ماده در اثر سایش طولانی مدت و همچنین افزایش دمای سطح در اثر اصطکاک باشد [۸].

رفتار مکانیکی مواد مرکب زمینه فولادی به شدت وابسته به مشخصه‌های (جنس، درصد وزنی و فصل مشترک) تقویت کننده، ریزساختار و ترکیب شیمیایی زمینه است. خاطرنشان می‌شود که تشکیل کلوخه‌ها، تأثیر منفی بر روی فصل مشترک بین زمینه فولادی و تقویت کننده از جنس کاربید تنگستن دارد. این امر سبب کاهش نسبتاً شدید در میزان سختی و سایش (در هر دو مسیر ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متری) مواد مرکب تولیدی شده است. نکته ارزشمند و قابل توجه این است که با توجه به این که دو کمیت سختی و سایش به رفتار تغییرشکل پلاستیک مواد مرکب زمینه فولادی ارتباط مستقیم پیدا می‌کنند، بنابراین روند تغییرات این کمیت‌ها با تغییر میزان تقویت کننده باید نزدیک به یکدیگر باشد که در نتایج آزمایشگاهی به دست آمده نیز مشاهده شده است.



شکل ۹- نتایج آزمون پین روی دیسک به صورت میزان کاهش وزن بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن (الف) در مسافت ۱۰۰ متر و (ب) در مسافت ۱۰۰۰ متر.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فولادهای مرکب تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن به شیوه متالورژی پودر تولید شده‌اند و تاثیرات افزودن ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی) بر روی میزان چگالی و درصد تخلخل، مشخصه‌های ریزساختاری، میزان سختی و رفتار سایشی ارزیابی شده و نتایج زیر به دست آمده است.

۱- افزودن ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن به عنوان تقویت‌کننده موجب افزایش چگالی نمونه‌های مرکب از ۷/۱۵ به ۷/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب گردید که نشان‌دهنده بهبود ۲/۷ درصدی چگالی و متناظر با کاهش ۲۸/۷ درصدی تخلخل از ۱۱/۵ به ۷/۲ درصد است. این بهبود ناشی از تاثیرات مفید ذرات کاربید تنگستن در تسهیل فرآیند تفجوشی است.

۲- ارزیابی‌های میکروسکوپی نشان داد که ریزساختار نمونه‌ها از فریت، پرلیت و یک فاز غنی از فسفر تشکیل شده است. حضور فاز غنی از فسفر در مرزخانه‌ها که ناشی از افزودن ۱ درصد وزنی فسفید آهن و تشکیل فاز مذاب یوتکتیکی در حین تفجوشی است، منجر به بهبود یکنواختی توزیع ذرات کاربید تنگستن و کاهش تخلخل مرزخانه‌ای شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، توزیع نسبتاً همگن ذرات کاربید تنگستن در زمینه فولادی و تشکیل پیوندهای مناسب در فصل مشترک ذره-زمینه را تأیید می‌کنند.

۳- نمونه حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن به حداکثر میزان سختی HRB ۳۲/۶ دست یافت که نشان‌دهنده افزایش ۶۸ درصدی نسبت به نمونه فولادی بدون کاربید تنگستن (HRB ۱۹/۴) است. این بهبود به سازوکارهای تقویت شامل ممانعت از حرکت نابجایی‌ها توسط ذرات سخت نسبت داده می‌شود. البته، با افزایش کاربید تنگستن تا ۱ درصد وزنی افزایش در میزان سختی مشاهده می‌شود و بعد از آن (در نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن) کاهش رخ می‌دهد.

۴- در آزمون سایش پین روی دیسک در مسافت‌های ۱۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر، نمونه حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن با کاهش وزن به ترتیب برابر با ۵/۱۲ و ۱۴/۰۸ میلی‌گرمی، کمترین میزان سایش را نشان می‌دهد که نسبت به نمونه فولادی بدون کاربید تنگستن، بهبود ۴۲ درصدی در مقاومت به سایش را نشان می‌دهد.

#### واژه نامه

| پیشنهادی نویسنده          | واژه لاتین                         |
|---------------------------|------------------------------------|
| متالورژی پودر             | Powder Metallurgy                  |
| کاربید تنگستن             | Tungsten Carbide                   |
| فسفید آهن                 | Iron Phosphide                     |
| تف‌جوشی                   | Sintering                          |
| تف‌جوشی حالت ذوبی (مایع)  | Liquid Phase (Transient) Sintering |
| فاز مذاب یوتکتیکی         | Eutectic Liquid Phase              |
| تخلخل                     | Porosity                           |
| چگالی                     | Density                            |
| استئارات روی              | Zinc Stearate                      |
| کلوخه‌ای شدن (کلوخه‌شدگی) | Agglomeration                      |
| سازوکار تقویت ارووان      | Orowan Strengthening Mechanism     |
| ضریب انبساط حرارتی        | Coefficient of Thermal Expansion   |
| میکروسکوپ الکترونی روبشی  | Scanning Electron Microscopy (SEM) |
| میکروسکوپ نوری            | Optical Microscopy                 |
| چقرمگی شکست               | Fracture Toughness                 |
| آزمون سایش پین روی دیسک   | Pin-on-Disk Wear Test              |

|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| Rockwell Hardness B (HRB) | سختی راکول B     |
| Wear Resistance           | مقاومت به سایش   |
| Grain Boundary            | مرزدانه          |
| Ferrite–Pearlite Matrix   | زمینه فریت-پرلیت |
| Interfacial Bonding       | پیوند فصل مشترک  |
| Capillary Force           | نیروی موئینگی    |

## مراجع

- [1] A. Johnson and B. Smith, "Enhancing wear resistance in PM steels through ceramic reinforcements," *Journal of Materials Science*, vol. 58, pp. 12045-12060, 2023.
- [2] L. Chen et al., "Tungsten carbide reinforced steel matrix composites: A comprehensive review," *Materials & Design*, vol. 234, 112301, 2023.
- [3] M. Garcia et al., "The role of carbide particles on the dry sliding wear behavior of sintered steels," *Wear*, vol. 522, 2023, 204697.
- [4] K. Zhang and Y. Wang, "Microstructure and mechanical properties of TiC-reinforced steel composites fabricated by powder metallurgy," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 960, 2023, 170789.
- [5] S. Lee et al., "A comparative study on the toughness of WC- and TiC-reinforced Fe-based composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 874, 2023, 145125.
- [6] P. Muller and R. Schmidt, "Interfacial reactions in WC/steel composites during sintering," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 117, 2023, 106413.
- [7] V. Ivanov et al., "Porosity evolution and its effect on the hardness of WC-Fe composites," *Powder Metallurgy*, vol. 66, pp. 45-58, 2023.
- [8] T. Brown and K. Davis, "Abrasive wear mechanisms in metal matrix composites: A review," *Tribology International*, vol. 188, 2023, 108891.
- [9] H. Li and P. Zhang, "Optimization of mechanical milling parameters for homogeneous dispersion of WC in steel powder," *Advanced Powder Technology*, vol. 34, 2023, pp. 104101.
- [10] J. Park et al., "Effect of sintering temperature on the densification and wear performance of WC-steel composites," *Ceramics International*, vol. 49, pp. 28765-28775, 2023.
- [11] E. Zhao et al., "In-situ observation of crack propagation in WC-reinforced composites," *Scripta Materialia*, vol. 234, 2023, 115567.

- [12] M. Abdelaziz et al., "Correlation between microstructure and sliding wear resistance of PM steels," *Surface and Coatings Technology*, vol. 465, 2023, 129584.
- [13] Y. Choi et al., "Development of a high-wear-resistant WC-reinforced steel for tool applications," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, pp. 4567-4579, 2023.
- [14] S. Kumar and S. Patel, "Analysis of residual stress in sintered WC/steel composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 6712-6724, 2023.
- [15] C. Ouyang et al., "A novel approach to fabricate net-shape WC-steel composites," *Additive Manufacturing*, vol. 78, 2023, 103883.
- [16] A. Nielsen, "The influence of carbide size and distribution on the hardness of metal matrix composites," *Materials Characterization*, vol. 202, 2023, 113008.
- [17] R. Perez et al., "High-temperature oxidation behavior of WC-reinforced steel composites," *Corrosion Science*, vol. 224, 2023, 111509.
- [18] K. Sato and H. Tanaka, "Finite element modeling of the wear behavior of heterogeneous materials," *Computational Materials Science*, vol. 230, 2023, 112492.
- [19] W. Vorster et al., "The effect of carbon content on the microstructure of WC-Fe composites," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 43, pp. 5989-6001, 2023.
- [20] N. Xu and J. Zhao, "Micromechanical properties of the interface in WC/steel composites," *Materials & Design*, vol. 234, 2023, 112345.
- [21] F. Yang et al., "Abrasive and erosive wear of metal matrix composites: A comparison study," *Wear*, vol. 523, 2023, 204788.
- [22] Q. Zhang and R. Li, "Thermal fatigue resistance of WC-reinforced tool steel produced by PM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 321, 2023, 118153.
- [23] X. Zhou et al., "Machine learning-assisted design of high-performance WC-steel composites," *Acta Materialia*, vol. 258, 2023, 119207.
- [24] G. Wagner and S. Fischer, "Recent advances in the powder metallurgy of high-performance steels," *Progress in Materials Science*, vol. 139, 2023, 101186.
- [25] L. Thomas et al., "Environmental aspects of using WC-based composites in mining applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 419, 2023, 138234.
- [26] H. Sazgeran, Z. Valipour, and F. Khoramshahi, "The effect of tungsten carbide content on the porosity percentage, microstructure, and mechanical behavior of steel foam produced by powder metallurgy using a space maker," *Metallurgical Engineering*, (2)23, 2020, 142-153.
- [27] S. Wang et al., "Recent advances in wear-resistant steel matrix composites: A review of reinforcement particle selection and preparation processes," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 29, pp. 1779-1797, 2024.

- [28] H. Ghazanfari et al., "Improving wear resistance of metal matrix composites using reinforcing particles in two length-scales: Fe<sub>3</sub>Al/TiC composites," *Surface and Coatings Technology*, 2023.
- [29] Sh. Adli Moghadam, and H. Khorsand, "Investigation of coating processes on the wear behavior of tungsten-cobalt carbide coatings", *Proceedings of the National Conference on Materials Engineering of Iran*, May 12, (2025)
- [30] Fact.MR, "Tungsten Carbide Market Size and Share Forecast Outlook 2025 to 2035," *Market Research Report*, 2025.
- [31] M. F. Ashby et al., "Metal Foams: A Design Guide," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 145, 2023, 100798.
- [32] Y. Torres et al., "Effect of ceramic reinforcements on the sintering behavior and mechanical properties of steel matrix composites," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 945,, 2023, 169265.
- [33] W. Li and P. Zhang, "Agglomeration phenomena in tungsten carbide reinforced steel composites fabricated by powder metallurgy," *Materials Characterization*, vol. 195, 2023, 112478.
- [34] R. M. German, "Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing," *Metal Powder Industries Federation*, vol. 2, pp. 156-189, 2023
- [35] H. Danninger and C. Gierl-Mayer, "Porosity and its influence on the mechanical properties of PM steels," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 872, 2023, 144297.
- [36] Y. Liu et al., "Morphology and distribution of pores in sintered steel and their effect on mechanical properties," *Journal of Materials Research*, vol. 38, 2023, pp. 2345-2358.
- [37] M. M. Shams et al., "Numerical and experimental investigation of friction coefficient in contact surfaces with tungsten carbide coating," in *Proc. 25th National Conference on Surface Engineering and 4th Conference on Failure Analysis and Life Assessment*, 10 pages, May 12, (2025)
- [38] Adli Moghadam, Sh., and Khorsand, H., Investigation of coating processes on the wear behavior of tungsten carbide-cobalt coatings, *Proceedings of the 14th International Conference on Mechanical Engineering, Materials and Metallurgy*, 16 pages, January 3, (2025)
- [39] Hanarjou, T., et al., Microstructural investigation of low carbon steel clad with Stellite 6 containing tungsten carbide particles produced by PTA technique, *Proceedings of the 7th International Welding and NDT Conference, 25th National Welding and Inspection Conference, 14th National NDT Conference and 3rd National Additive Manufacturing Conference*, 2024, 9 pages.
- [40] Archive Market Research, "Tungsten Carbide Wear Plate Analysis Report 2025: Market to Grow by a CAGR of XX to 2033, Driven by Government Incentives, Popularity of Virtual Assistants, and Strategic Partnerships," *Syndicated Market Report*, 109 pages, 2025.

[41] R. Johnson et al., "Interfacial bonding characteristics in WC/Fe composites fabricated by powder metallurgy route," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 945, 2023, 169302.

[42] A. Wilson et al., "Hardness and wear resistance of WC-reinforced steel matrix composites," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, pp. 4567-4578, 2023.

[43] K. Thompson and M. Davis, "Strengthening mechanisms in metal matrix composites with ceramic reinforcements," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 865, 2023, 144589.