

## ارزیابی میزان سختی و رفتار فشاری فولادهای تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن

هادی نصیری<sup>۱</sup>، حمید سازگار<sup>۲\*</sup> و علی محمد ناصریان نیک<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

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

(h.sazegaran@qiet.ac.ir)

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

### چکیده

در این پژوهش، با استفاده از روش متالورژی پودر، ذرات کاربید تنگستن به عنوان تقویت‌کننده (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) به فولاد حاوی ۰/۵ درصد وزنی کربن اضافه شدند. شایان توجه است که ۲ درصد وزنی فسفید آهن به منظور ایجاد سازوکار تف‌جوشی حالت ذوبی به مخلوط‌های پودری تهیه شده اضافه شد. میزان چگالی، درصد تخلخل، رفتار فشاری و میزان سختی نمونه‌های فولاد تقویت شده اندازه‌گیری گردید. در ادامه، ریزساختار فولادهای تف‌جوشی شده توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مطالعه شد. نتایج حاکی از آن است که میزان چگالی نمونه‌های تف‌جوشی شده بین ۶۹۲۷/۹ تا ۷۱۰۱/۱  $\text{kg/m}^3$  و درصد تخلخل بین ۱۷/۲۱ تا ۱۹/۴۱ درصد است. علاوه بر این، ریزساختار نمونه‌های فولادی حاوی فریت چندوجهی و پرلیت است. در نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت‌کننده درون فاز زمینه در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد. همچنین میزان سختی، ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و استحکام فشاری فولادهای تقویت شده با افزایش مقدار کاربید تنگستن تا ۲ درصد وزنی افزایش و سپس، روند کاهشی نشان می‌دهند که به تغییرات درصد تخلخل، بروز پدیده کلوخه‌ای شدن و همچنین ممانعت ذرات تقویت‌کننده از متراکم شدن در طی فرآیند فشردن در نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن ارتباط دارد.

کلمات کلیدی: متالورژی پودر، ذرات کاربید تنگستن، رفتار فشاری، سختی، ریزساختار

## Investigation on Compressional Properties and Hardness of WC Reinforced Steels

### Abstract

In this work, using the powder metallurgy method, tungsten carbide particles (0, 0.5, 1, 2, and 4 wt.%) were added as reinforcement to the steel containing 0.5 wt.% of carbon. It is worth noting that 2 wt.% of iron phosphide was added to the prepared powder mixture in order to create a liquid phase sintering mechanism. Density, porosity content, compressive properties, and hardness of reinforced specimens were experimentally examined. In addition, the microstructure of sintered steels was studied using optical and scanning electron microscopes. The obtained results indicate the density is between 6927.9 to 7101.1  $\text{kg/m}^3$  and the porosity is between 17.21 to 19.41%. The microstructure of the steel specimens contains ferrite and pearlite. In the specimen containing 4 wt.% of tungsten carbide, the agglomeration of reinforcing particles in the steel matrix was observed in the SEM micrographs. Also, it can be seen, the hardness, elasticity coefficient, yield strength and compressive strength of reinforced steels increased by adding the amount of tungsten carbide up to 2 wt.%. After that the mentioned properties showed a decreasing trend, which is due to changes in the percentage of porosity and occurrence of agglomeration phenomenon. Another reason for such effect is the prevention of reinforcement particles from condensing during the compression process for specimen with 4 wt.% of tungsten carbide.

**Keywords:** Powder metallurgy, WC particles, Compressional properties, Hardness, Microstructure

## ۱- مقدمه

فولادها دسته‌ای از آلیاژهای مهندسی هستند که به دلیل داشتن ویژگی‌های جالب توجه و منحصر به فرد قابلیت به کار گرفتن در بسیاری از کاربردهای صنعتی مختلف را دارند [۱]. میزان کربن، افزودن سایر عناصر آلیاژی، نحوه فولادسازی، فرآیندهای متنوع تولید و نوع عملیات حرارتی نهایی از جمله مهم‌ترین عوامل موثر بر رفتار مکانیکی فولادهای صنعتی هستند [۳ و ۲]. در این میان، فرآیند تولید می‌تواند تاثیر فراوانی بر روی ریزساختار و در نتیجه، ویژگی‌های مکانیکی و همچنین مشخصه‌های عملکردی فولادها در شرایط کاری گوناگون داشته باشد [۵ و ۴]. شایان توجه است که با تغییر عوامل تولید می‌توان به بهینه ویژگی‌های مکانیکی محصولات فولادی دست یافت. افزودن ذرات تقویت‌کننده و تولید مواد مرکب زمینه فولادی با تقویت‌کننده ذره‌ای یکی از شیوه‌های ارتقای ویژگی‌های مکانیکی فولادهاست [۷ و ۶]. هر چند که عناصر آلیاژی و ریزساختار زمینه در مواد مرکب زمینه فولادی حائز اهمیت هستند، اما ویژگی‌های مکانیکی شدیداً تحت تاثیر اندازه، شکل، توزیع و جنس ذرات تقویت‌کننده است [۸].

فرآیندهای تولید مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات به دو دسته کلی متالورژی ذوبی و متالورژی پودر دسته‌بندی می‌شود که روش متالورژی پودر به علت سهولت در اختلاط، توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات و همچنین عدم بروز مشکلات ناشی از ایجاد مذاب (همانند تشکیل اکسیدها و انحلال گازها) بسیار پر کاربرد است. در روش متالورژی پودر، ذرات تقویت‌کننده اغلب به مخلوط پودرهای آهن به همراه سایر عناصر آلیاژی و یا به پودرهای پیش‌آلیاژی افزوده می‌شوند و توزیع یکنواخت این ذرات در حین فرآیند اختلاط می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی همسانگرد را بعد از فرآیند تفجوشی در قطعات تولیدی به ارمغان بیاورد [۹]. ذرات مختلفی به عنوان تقویت‌کننده در تولید مواد مرکب زمینه فولادی به کار گرفته می‌شوند که مهم‌ترین مشخصه آن‌ها سختی بالا است. اغلب کاربید تیتانیوم [۱۰ و ۱۱]، کاربید سیلیسیم [۱۲]، نیتريد سیلیسیم [۱۳] و کاربید تنگستن [۱۴ و ۱۵] به عنوان ذرات تقویت‌کننده در مواد مرکب زمینه فولادی به کار گرفته می‌شوند و دارای سختی نسبتاً بالایی هستند.

در مطالعه دنگ و همکارش [۱۶]، فولاد زنگ‌نزن تقویت شده با کاربید تنگستن با استفاده از نورد و تفجوشی تولید شده است و نتایج نشان می‌دهد که عوامل تولید و مقدار کاربید تنگستن بر روی ویژگی‌های مکانیکی موثر است. بهترین رفتار کششی در نمونه تفجوشی شده در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  با ۳۵ درصد نورد که حاوی ۱۰ درصد وزنی کاربید تنگستن می‌باشد، گزارش شده است. در روش رسوب‌دهی مستقیم با انرژی، تا حدود ۵۰ درصد وزنی کاربید تنگستن در ریزساختار پوشش ایجاد شده بر روی فولاد ابزار گرم‌کار کروم‌دار H13 مشاهده شده است که بهینه عملکرد این پوشش در ۴۰ درصد وزنی کاربید تنگستن می‌باشد [۱۷]. نتایج لیو و همکارانش [۱۸] حاکی از آن

است که افزودن کاربید تنگستن به شدت سبب بهبود میزان سختی و مقاومت به سایش فولاد AISI 1045 شده است. علاوه بر این، در مقادیر بالای کاربید تنگستن (بیشتر از ۲۰ درصد وزنی)، تشکیل فاز  $(Fe,W)_6C$  در مواد مرکب زمینه فولادی تولید شده به روش ساخت افزایشی گزارش شده است و با افزایش درصد وزنی کاربید تنگستن، شکست ترد رخ می‌دهد [۱۸].

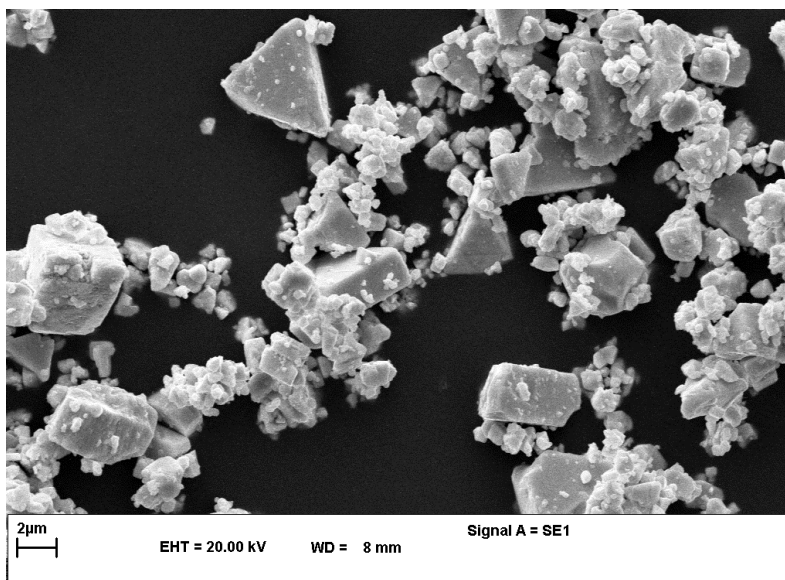
بهبود استحکام و چقرمگی به صورت توأمان در فولادهای تقویت شده با کاربید تنگستن که به روش فلزخورانی و نفوذ فاز جامد به صورت درجا تولید شده‌اند، توسط بای و همکارانش [۱۹] نشان داده شده است. قابل ذکر است که افزودن عناصر خاکی کمیاب تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی ریزساختار فولاد تقویت شده با کاربید تنگستن تولید شده به روش متالورژی پودر و تفجوشی شده در خلأ ندارد. این در حالی است که بهبود ویژگی‌های مکانیکی با افزودن عناصر خاکی کمیاب مشاهده شده است [۲۰]. هر چند مطالعات فراوانی بر روی مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن که به روش‌های متنوعی تولید شده‌اند، صورت گرفته است [۲۱-۲۴]، اما تاثیر مقادیر نسبتاً پایین کاربید تنگستن (کمتر از ۴ درصد وزنی) بر روی رفتار مکانیکی فولاد تولید شده به روش متالورژی پودر مطالعه نشده است. هدف اصلی این پژوهش، تولید و ارزیابی میزان تخلخل، ریزساختار، رفتار فشاری و میزان سختی فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) است.

## ۲- مواد و روش انجام آزمون‌ها

### ۲-۱- مواد و فرآیند تولید

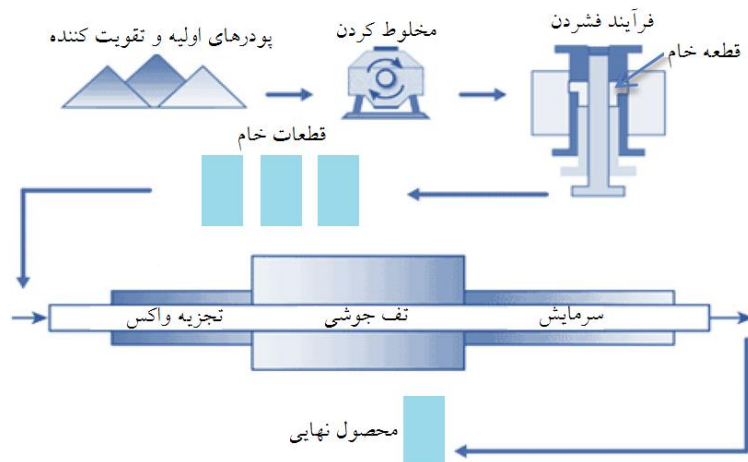
به منظور تولید نمونه‌های فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن از پودرهای آهن (تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد، با میزان خلوص ۹۹/۹ درصد و میانگین ذرات ۶۵ میکرون)، کربن (۰/۵ درصد وزنی)، فسفید آهن (۲ درصد وزنی به منظور ایجاد یک فاز یوتکتیک مذاب در دمای فرآیند تفجوشی و تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد، با میزان خلوص ۹۸ درصد و میانگین ذرات ۲۵ میکرون) و کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی به عنوان تقویت‌کننده سرامیکی و تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد، با میزان خلوص ۹۹ درصد و میانگین ذرات ۱۰ میکرون) استفاده شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات کاربید تنگستن به عنوان تقویت‌کننده سخت و مستحکم در شکل ۲ نشان داده شده است. علاوه بر این، ۱ درصد وزنی استئارات روی به عنوان روان‌کار حالت جامد به همه مخلوط‌های پودری اضافه شد تا سبب تراکم‌پذیری بیشتر مخلوط‌های پودری در طی مرحله فشردن شود [۲۵]. باید در نظر داشت که پودرهای مورد استفاده از شرکت متالورژی پودر خراسان تهیه شدند. پودرهای تهیه شده بعد از توزین توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم، با یک مخلوط‌کن مخصوص متالورژی پودر با سرعت چرخش ۲۵۰ rpm و به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط شدند و توزیع کاملاً یکنواخت

از ذرات پودری حاصل شد. بر اساس مقدار کاربید تنگستن اضافه شده به مخلوط‌های پودری، پنج نوع مخلوط پودری تهیه شد که تفاوت آن‌ها فقط در مقدار کاربید تنگستن افزوده شده است.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات کاربید تنگستن مورد استفاده به عنوان تقویت کننده.

پس از انجام فرآیند اختلاط و تهیه مخلوط‌های پودری، فرآیند فشرده‌سازی توسط یک دستگاه پرس هیدرولیک دو طرفه (۳۰ تن) و درون یک قالب از جنس فولاد زنگ‌نزن 316L صورت گرفت. قالب مورد استفاده دارای یک حفره استوانه‌ای شکل با طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۲ میلی‌متر است و سنبه‌های مورد استفاده برای فشرده‌سازی از جنس فولاد ابزار گرم‌کار H13 هستند که فرآیند فشردن را از دو طرف انجام می‌دهند. شایان توجه است که فشردن از دو طرف از بروز پدیده پافیلی در نمونه‌های اولیه ممانعت می‌نماید. در ادامه، نمونه‌های خام تولید شده با ارتفاع ۲۰ میلی‌متر به منظور انجام فرآیند تف‌جوشی درون یک کوره تونلی سه مرحله‌ای قرار داده شدند. در مرحله اول، خروج واکس (همان استئارات روی) در دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در مدت زمان ۳۵ دقیقه صورت گرفت. در مرحله دوم، تف‌جوشی در دمای ۱۱۲۰ °C و در مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. در آخرین مرحله، فرآیند سرد شدن تا دمای محیط در مدت ۲۵۰ دقیقه به تدریج صورت گرفت. قابل توجه است که محیط کوره، آمونیاک شکسته است و مقداری هیدروژن به آن اضافه می‌شود تا اتمسفر کوره به ترکیب شیمیایی ۹۰ درصد حجمی هیدروژن و ۱۰ درصد حجمی نیتروژن برسد. مراحل تولید نمونه‌ها به روش متالورژی پودر در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایش شماتیک شیوه تولید مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن.

## ۲-۲- تعیین چگالی و درصد تخلخل

عملیات پلیسه‌گیری بعد از فرآیند تف‌جوشی بر روی نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن درون یک محفظه استوانه‌ای دوار با سرعت چرخش ۱۵۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه که حاوی گوه‌های پلیسه‌گیر است، صورت گرفت. شایان توجه است که انجام این عملیات تأثیری بر روی ابعاد نمونه‌های تولیدی ندارد. در نهایت، نمونه‌هایی با قطر ۱۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۸ میلی‌متر توسط برش با دستگاه وایرکات (DK7735) تهیه گردید. مقدار چگالی و درصد تخلخل نمونه‌های تولیدی به روش اندازه‌گیری ابعادی و توزین (توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم) تعیین شد. از رابطه (۱) برای تعیین مقدار چگالی و از رابطه (۲) برای تعیین درصد تخلخل استفاده شد [۲۶]. باید در نظر داشت که برای تعیین درصد تخلخل نمونه‌های تف‌جوشی شده، چگالی جامد (همان چگالی فولاد کاملاً متراکم) برابر  $7/85 \text{ g/cm}^3$  در نظر گرفته شده است.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$P = \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{PM}}{\rho_S} \right) \right] \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در روابط فوق،  $\rho$  میزان چگالی،  $m$  جرم،  $V$  حجم،  $P$  درصد تخلخل،  $\rho_{PM}$  چگالی قطعه فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر و  $\rho_S$  چگالی جامد یا چگالی فولاد کاملاً متراکم است.

### ۳-۲- مطالعات میکروسکوپی

برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های فولاد تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن و همچنین ارزیابی و مشاهده فازهای موجود در ریزساختار از میکروسکوپ نوری (LM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM مدل LEO 1450VP) استفاده شد. ابتدا، قطعات تفجوشی شده توسط دستگاه وایرکات (DK7735) در جهت عمود به محور استوانه برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانیت گرم، سمباده‌زنی و پولیش‌کاری به ترتیب بر روی آن‌ها انجام شد. در ادامه، فرآیند حکاکی (اچ) در محلول نایتال صورت گرفت. قابل ذکر است که ابتدا نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و سپس، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند. باید خاطر نشان کرد که نرم‌افزار پردازش تصویر MIP برای تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپی مورد استفاده واقع شد.

### ۴-۲- رفتار مکانیکی

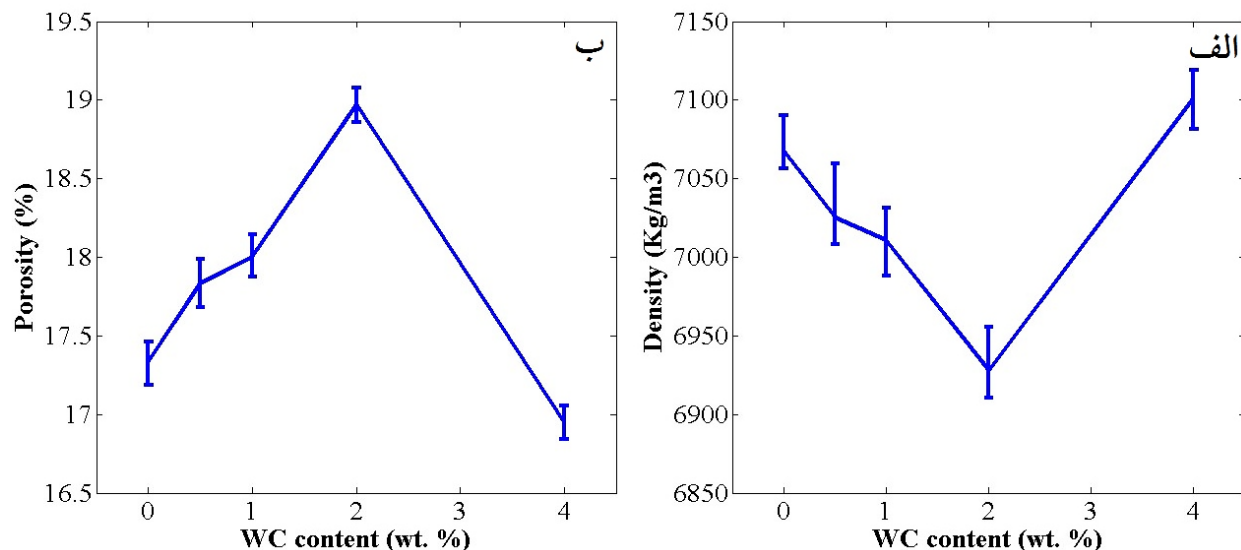
برای تعیین رفتار مکانیکی مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن آزمون‌های سختی و فشار به کار گرفته شد. سختی توسط دستگاه ویکرز به کمک فرورونده الماسی هرمی شکل انجام شد. قابل ذکر است که قبل از انجام آزمون سختی‌سنجی ویکرز، سطوح نمونه‌هایی که توسط وایرکات مسطح بریده شده‌اند، کاملاً تمیز و عاری از هر گونه آلودگی شدند. نیروی اعمالی در این آزمون برابر ۲۰ کیلوگرم انتخاب شد و نتایج بر اساس میانگین ۵ اندازه‌گیری ارائه گردید. آزمون فشار یونیورسال توسط دستگاه Zwick مدل Z250 بر روی نمونه‌های برش داده شده با قطر ۱۲ mm و ارتفاع ۱۸ mm صورت گرفت و نتایج بر اساس میانگین ۳ آزمون ارائه شد. سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر ۲ mm/min انتخاب گردید. به منظور کاهش اصطکاک و همچنین کاهش تشکیل نواحی مرده، روان‌کاری بین فک و نمونه‌ها توسط روغن مخصوص صورت گرفت. قابل ذکر است که سطوح نمونه‌ها که توسط وایرکات برش داده شده‌اند، کاملاً مسطح است. این در حالی است که سطوح همه نمونه‌های مرکب قبل از انجام آزمون سختی‌سنجی پولیش شد تا میزان خطای اندازه‌گیری کاهش یابد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- چگالی و تخلخل

همان طور که می‌دانیم، میزان چگالی (و یا به صورت معکوس درصد تخلخل) تاثیر قابل توجهی بر روی رفتار مکانیکی قطعات فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر دارد [۲۷ و ۲۸]. این قبلا مشاهده شده است که علاوه بر ترکیب شیمیایی آلیاژ، درصد تخلخل نیز بر روی دگرگونی‌های فازی و همچنین بر روی رفتار مکانیکی فولادهای تولید شده به روش متالورژی پودر موثر است [۲۹]. در شکل ۳، میزان چگالی و درصد تخلخل مواد مرکب زمینه فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میزان چگالی بین  $6927/9$  تا  $7101/1 \text{ kg/m}^3$  و درصد تخلخل بین  $17/21$  تا  $19/41$  درصد اندازه‌گیری شده است. مطابق با شکل، میزان چگالی نمونه‌های تفجوشی شده تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش پیدا می‌کند و به تبعیت از آن، درصد تخلخل آن‌ها افزایش نشان می‌دهد. احتمالا کاهش میزان چگالی و افزایش درصد تخلخل به اثر ذرات کاربید تنگستن بر روی ممانعت از متراکم شدن ذرات آهن در مرحله فشردن ارتباط پیدا می‌کند [۳۰].

این در حالی است که میزان چگالی در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن افزایش چشمگیر نشان می‌دهد و به تبع آن کاهش در درصد تخلخل محاسبه شده در این نمونه رخ می‌دهد. احتمالا این افزایش در میزان چگالی و کاهش در درصد تخلخل به بالا بودن چگالی کاربید تنگستن ( $15800 \text{ kg/m}^3$ ) در مقایسه با چگالی فولاد ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ) مرتبط می‌گردد. بنابراین می‌توان بیان کرد که دو عامل موثر بر روی میزان چگالی و درصد تخلخل فولادهای تولید شده به روش متالورژی پودر که توسط ذرات کاربید تنگستن تقویت شده‌اند، شامل میزان اثرگذاری ذرات تقویت کننده بر روی متراکم شدن در مرحله فشردن و میزان چگالی ذرات تقویت کننده است. بر این اساس، عامل اول تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن نسبت به عامل دوم تاثیر بیشتری دارد و در نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، عامل دوم اثر بیشتری از خود نشان می‌دهد.



شکل ۳- الف) میزان چگالی و ب) درصد تخلخل نمونه‌های تف‌جوشی شده.

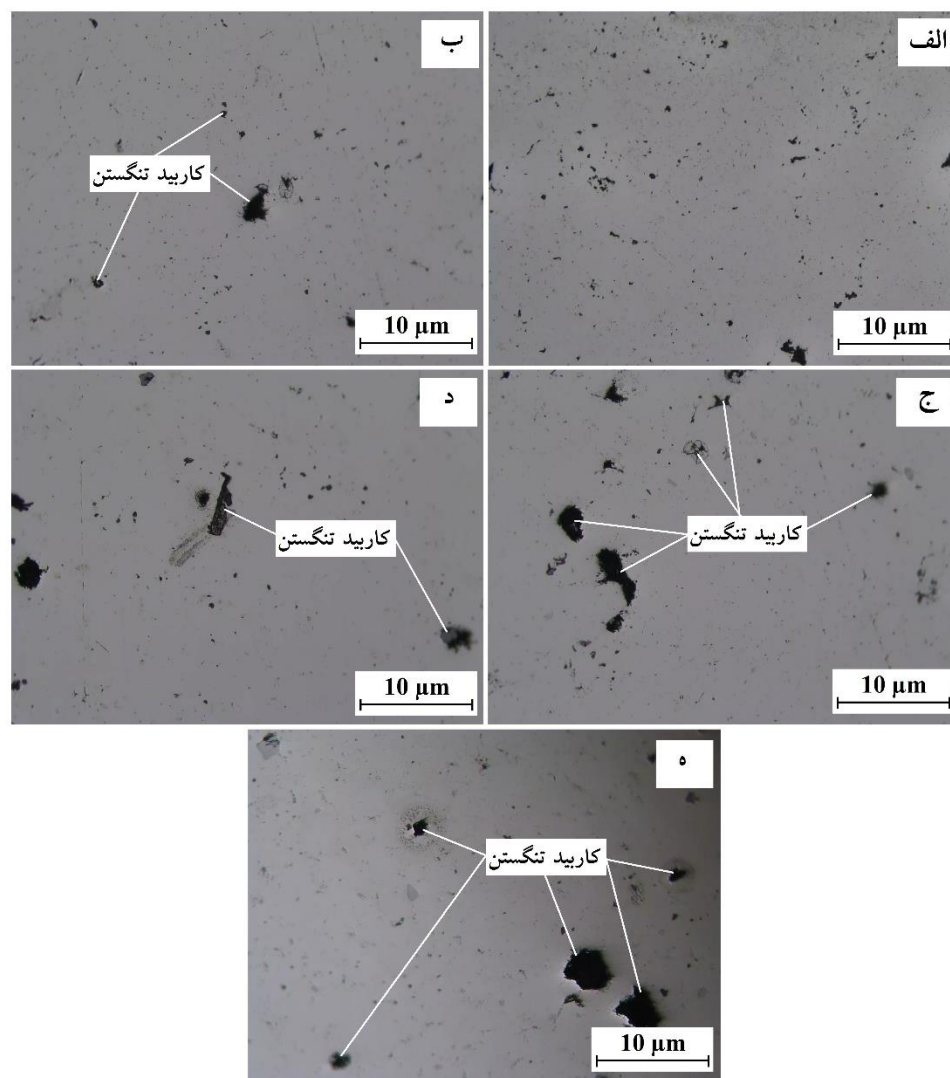
## ۲-۳- ریزساختار

در شکل ۴، تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از انجام فرآیند حکاکی بر روی نمونه‌های فولادی حاوی مقادیر مختلف کاربید تنگستن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فولاد بدون کاربید تنگستن نیز نواحی سیاه رنگ مشاهده می‌شود که به تشکیل حفرات در میان ذرات آهن تف‌جوشی شده به یکدیگر ارتباط پیدا می‌کند [۳۱ و ۳۲]. در سایر تصاویر علاوه بر این نواحی، نواحی سیاه رنگ دیگری نیز مشاهده می‌شوند که به دلیل داشتن سطوح صاف و یا باقی ماندن قسمت‌هایی از کاربید تنگستن احتمالاً به وجود ذرات کاربید تنگستن در مواد مرکب زمینه فولادی تف‌جوشی شده ارتباط دارند. باید در نظر داشت که اغلب از ذرات کاربیدی به خاطر این که سختی بالایی دارند، در طی فرآیند سمباده‌زنی و پولیش کاری از محل خود جدا و خارج می‌شوند. شایان توجه است که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به دلیل بالا بودن عمق میدان، احتمال مشاهده شدن قسمتی از ذرات کنده شده در قسمت انتهایی حفرات خیلی بیشتر است.

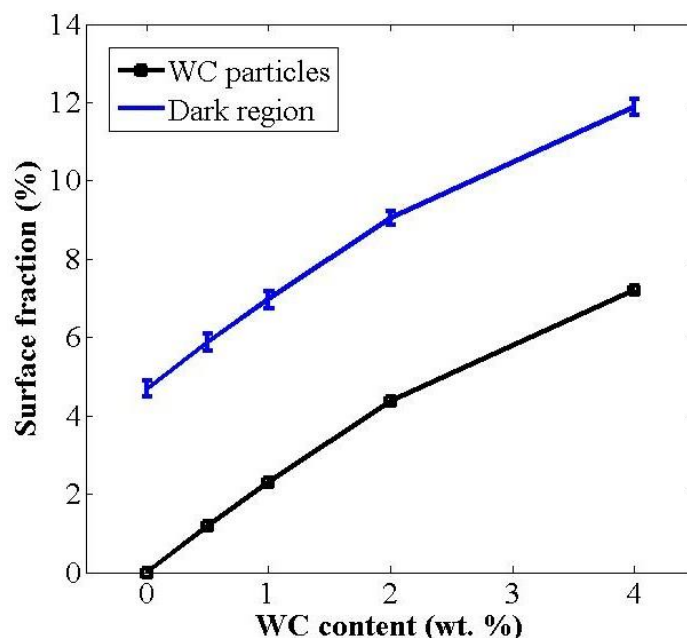
کسر سطحی نواحی سیاه رنگ در ۱۰ تصویر میکروسکوپ نوری از فولادهای حاوی مقادیر گوناگون کاربید تنگستن توسط نرم افزار MIP اندازه‌گیری شده است. در صورتی که مقادیر کسر سطحی به دست آمده برای نمونه‌های مختلف از کسر سطحی نواحی سیاه رنگ موجود در تصاویر نمونه بدون کاربید تنگستن کم شود، می‌توان کسر سطحی مربوط به ذرات کاربید تنگستن را به دست آورد. کسر سطحی نواحی سیاه رنگ (که توسط نرم‌افزار پردازش تصویر اندازه‌گیری شده‌اند) و کسر سطحی ذرات کاربید تنگستن (که براساس نتایج محاسبه شده‌اند) در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کسر سطحی نواحی سیاه رنگ و کسر سطحی



کاربید تنگستن با افزایش درصد وزنی کاربید تنگستن افزایش می‌یابد. البته باید خاطر نشان کرد که شیب نمودارها در مقادیر بالاتر از ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش می‌یابد که این نیز به دو عاملی که در بخش قبل بررسی شد، یعنی اثر کاربید تنگستن بر ممانعت از متراکم شدن در مرحله فشردن و اختلاف زیاد چگالی کاربید تنگستن با آهن، می‌تواند مربوط باشد.

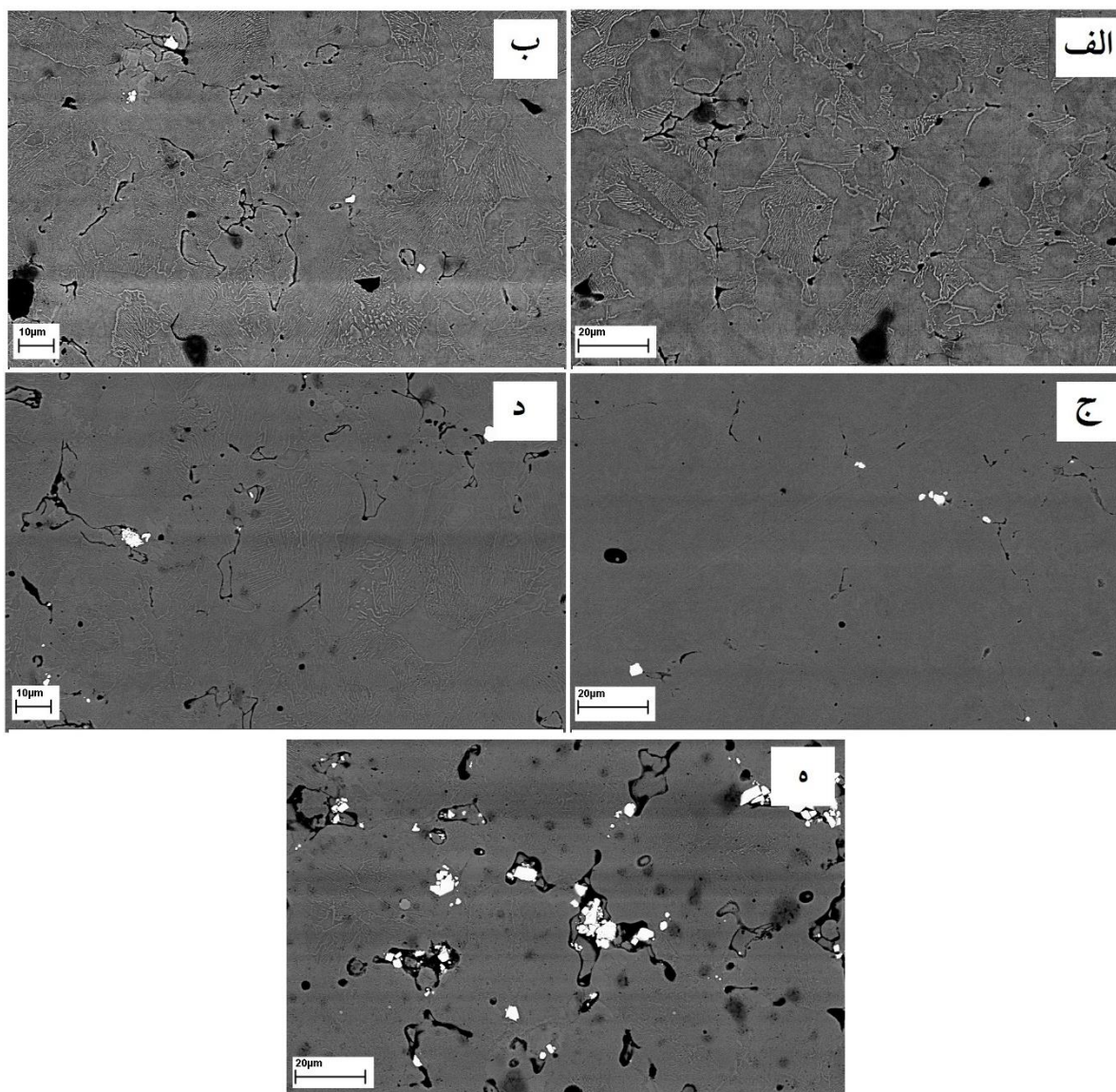


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از حکاکی از سطوح فولادهای حاوی الف) ۰ درصد وزنی کاربید تنگستن، ب) ۰/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن، ج) ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن، د) ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن و ه) ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن.



شکل ۵- کسر سطحی نواحی سیاه رنگ و کسر سطحی کاربید تنگستن موجود در تصاویر میکروسکوپ نوری بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن افزوده شده که توسط نرم افزار MIP پردازش شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح نمونه‌های فولادی حاوی مقادیر مختلف کاربید تنگستن بعد از فرآیند حکاکی توسط محلول نایتال در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار همه نمونه‌ها شامل فریت و پرلیت است. خاطرنشان می‌گردد که مقدار گرافیت اضافه شده به مخلوط پودری مورد استفاده برای همه نمونه‌های فولادی تفجوشی شده برابر ۰/۵ درصد وزنی است که منبع تشکیل کاربید آهن خواهد بود. علاوه بر این، شرایط مناسب برای انجام پدیده نفوذ اتم‌های کربن در دمای تفجوشی (یعنی دمای °C ۱۱۲۰) فراهم است [۳۳ و ۳۴]. بنابراین، با نفوذ اتم‌های کربن به حفرات اکتاهدرال و تتراهدرال بین‌نشینی در ساختار اتم‌های آهن در شرایط مناسب دما و زمان تفجوشی، فاز فریت که محلول جامد کربن در آهن آلفا با ساختار مکعبی مرکز پر (BCC) است و همچنین فاز آستنیت که محلول جامد کربن در آهن گاما با ساختار مکعبی با سطوح مرکز پر (FCC) است، تشکیل می‌گردد. شایان توجه است که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، فاز فریت با ریخت چند وجهی (پلی‌گونال) مشاهده می‌شود. در اثر دگرگونی یوتکتوئید در اندکی پایین‌تر از دمای یوتکتوئید، فاز آستنیت به لایه‌های متناوب فریت و سمانتیت (یا همان پرلیت) تبدیل می‌گردد [۳۵] که فریت چند وجهی و لایه‌های متناوب پرلیت در همه تصاویر میکروسکوپی به وضوح دیده می‌شود.



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از انجام فرآیند حکاکی از سطوح فولادهای حاوی با الف) ۰ درصد وزنی کاربید تنگستن، ب) ۰/۵ درصد وزنی کاربید تنگستن، ج) ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن، د) ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن و ه) ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن.

علاوه بر این، در نمونه‌های فولادی حاوی کاربید تنگستن (تا حداکثر ۲ درصد وزنی)، پراکندگی ذرات با توزیع نسبتاً یکنواخت در زمینه مشاهده می‌شود که اثبات می‌کند که فرآیند اختلاط ذرات پودر با یکدیگر به صورت مناسب صورت گرفته است. توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات تقویت‌کننده سرامیکی می‌تواند سبب ارتقای ویژگی‌های مکانیکی ماده مرکب زمینه فولادی نهایی گردد [۳۶]. این در حالی است که با افزایش درصد وزنی فاز تقویت‌کننده، امکان کلوخه‌ای شدن (آگلومره شدن) ذرات در زمینه وجود دارد. در نمونه‌های فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید

تنگستن، پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت‌کننده درون زمینه فولادی رخ می‌دهد که نمونه‌ای از آن که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمایان شده بود، در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. جالب توجه است که در اطراف نواحی کلوخه‌ای شده، اتصال ذرات کلوخه‌ای به زمینه فولادی بسیار ضعیف است و اغلب حفرات فراوانی در اطراف ناحیه کلوخه‌ای مشاهده می‌گردد. تشکیل چنین حفراتی در اطراف نواحی کلوخه‌ای می‌تواند تاثیر منفی چشمگیری بر روی رفتار مکانیکی و همچنین عملکرد فولاد تقویت شده داشته باشد. از طرف دیگر، این احتمال می‌رود که وجود این حفرات و بروز پدیده کلوخه‌ای شدن می‌تواند کاهش ویژگی‌های مکانیکی در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن را به نتیجه می‌دهد.



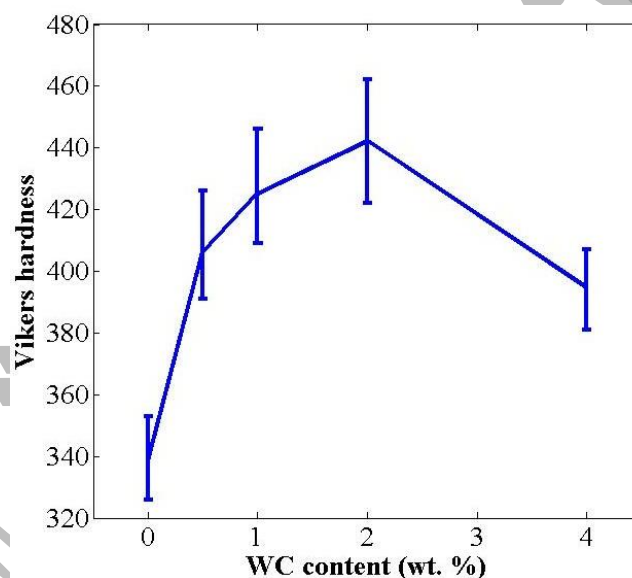
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه فولادی حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن که نمایش‌دهنده کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت‌کننده در زمینه فولادی است.

### ۳-۳- رفتار مکانیکی

سازوکارهای استحکام‌بخشی در فلزات و آلیاژها شامل: کاهش اندازه دانه، کارسختی، افزایش سختی با عناصر آلیاژی، رسوب‌سختی، بهبود سختی با ذرات تقویت‌کننده یا تولید مواد مرکب، استفاده از عملیات حرارتی و دگرگونی‌های فازی است. در مواد مرکب، با وجود این که افزودن تقویت‌کننده‌های سخت به شکل ذره می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نیز موثر باشد [۳۷ و ۳۸]، اما اغلب بهبود رفتار مکانیکی محصول نهایی هدف غایی است. در پژوهش حاضر، میزان سختی و رفتار فشاری نمونه‌های فولادی تقویت شده با مقادیر مختلف ذرات کاربید تنگستن ارزیابی شده است. در شکل ۸، اثر افزودن ذرات کاربید تنگستن بر روی میزان سختی و یکرز نمونه‌های فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر به تصویر کشیده شده است. میزان سختی و یکرز نمونه‌های تولید شده بین ۳۳۸/۶۶ و ۴۴۲/۳۳ اندازه‌گیری شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، مقادیر سختی با افزودن ذرات تقویت‌کننده کاربید تنگستن به زمینه فولاد افزایش قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد. البته، بهبود میزان



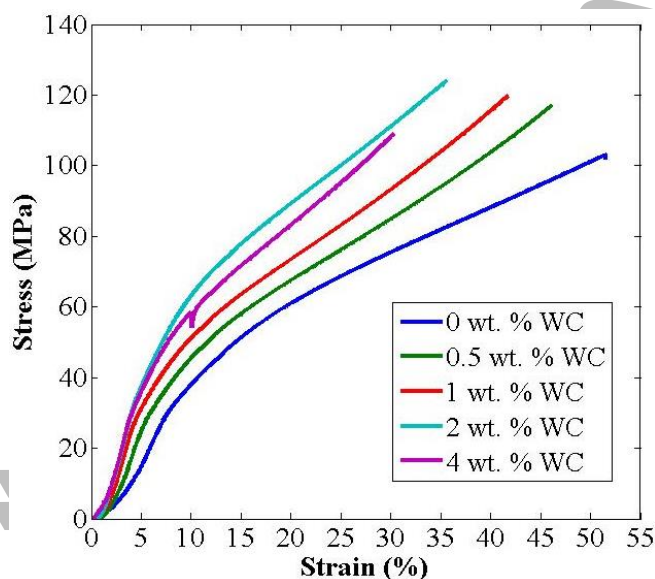
سختی با افزودن ذرات تقویت کننده سخت (همانند کاربید سیلیسیم) به زمینه نرم فلزی (همانند آلومینیوم) قبلاً نیز گزارش شده است [۳۹]. با افزودن ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن به ترتیب حدوداً ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۱۷ درصد بهبود در مقدار سختی نمونه‌های فولاد تقویت شده رخ می‌دهد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن، میزان سختی ویکرز افزایش می‌یابد و پس از آن، شیب افزایش سختی در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن افت می‌کند. البته، این در حالی است که نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن در حدود ۵۶ ویکرز در مقایسه با نمونه تقویت نشده سخت تر است. بهبود میزان سختی در نمونه‌های تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن احتمالاً به اثر ممانعت کنندگی ذرات بر روی حرکت نابجایی‌ها و جلوگیری از ایجاد تغییر شکل پلاستیک ارتباط می‌یابد [۴۰]. این در حالی است که احتمالاً پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده در فولاد حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن سبب کاهش میزان سختی در این ماده مرکب می‌گردد. باید در نظر داشت که کلوخه‌ای شدن از توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده درون زمینه فولادی ممانعت می‌کند و علاوه بر این، تشکیل حفرات در نواحی کلوخه‌ای شدن منجر به کاهش میزان سختی خواهد شد.



**شکل ۸-** میزان سختی ویکرز نمونه‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن بر حسب درصد وزنی کاربید تنگستن افزودنی.

منحنی‌های تنش-کرنش فشاری نمونه‌های فولاد تقویت شده با مقادیر مختلف کاربید تنگستن در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، همه منحنی‌های تنش-کرنش فشاری به دست آمده یک روند تقریباً مشابه را نشان می‌دهند که شامل دو بخش مجزای ناحیه الاستیک و ناحیه پلاستیک است. علاوه بر این، منحنی‌ها با افزایش مقدار کاربید تنگستن به سمت بالا و به سمت چپ شیف‌ت پیدا می‌کنند. بهبود رفتار فشاری مواد مرکب تولید شده می‌تواند به فعال شدن مکانیزم استحکام‌بخشی توسط ذرات سخت ارتباط پیدا کند [۴۱].

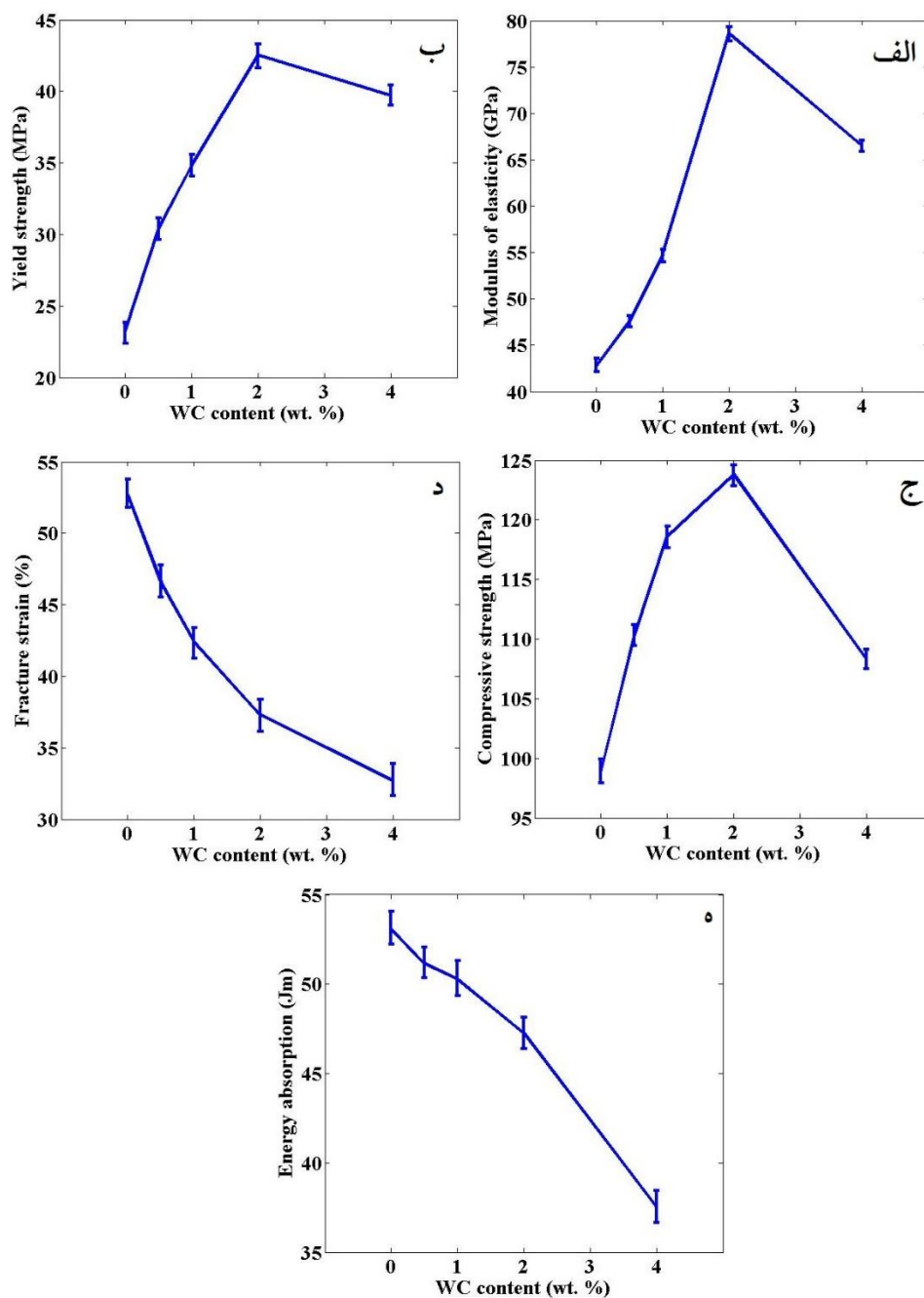
البته، در مورد منحنی نمونه‌ی فولاد حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، افت تنش و کرنش به صورت توأمان در مقایسه با نمونه فولادی حاوی ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن دیده می‌شود. بروز چنین رفتاری احتمالاً به بیش از حد بودن ذرات سخت و مستحکم کاربید تنگستن ارتباط می‌یابد. این امر سبب تشکیل کلوخه‌هایی از ذرات تقویت‌کننده در زمینه فولادی می‌شود. تشکیل نواحی کلوخه‌ای و همچنین ممانعت از متراکم شدن در طی مرحله فشردن در مقادیر زیاد کاربید تنگستن می‌تواند دلایل اصلی افت رفتار فشاری در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن در مقایسه با سایر فولادهای تقویت شده باشد. به بیان دیگر، مقادیر زیاد تقویت‌کننده از توزیع یکنواخت آن جلوگیری می‌کند. تشکیل تخلخل در نواحی کلوخه‌ای نیز می‌تواند سبب تمرکز تنش، جوانه‌زنی و رشد ترک گردد. علاوه بر این، مقادیر زیاد کاربید تنگستن سبب کاهش میزان تراکم‌پذیری در طی مرحله فشردن می‌گردد که کاهش ویژگی‌های مکانیکی نهایی را نتیجه می‌دهد.



**شکل ۹- منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فولادهای مرکب تفجوشی شده با مقادیر گوناگون تقویت‌کننده.**

نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فولادهای تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن شامل ضریب کشسانی، استحکام تسلیم، استحکام فشاری، کرنش نقطه شکست و میزان انرژی جذب شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و استحکام فشاری با افزایش مقدار ذرات کاربید تنگستن تا ۲ درصد وزنی افزایش و بعد از آن کاهش نشان می‌دهند. تشکیل کلوخه‌های ذرات تقویت‌کننده در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن می‌تواند این رفتار را توجیه کند. علاوه بر این، با افزایش مقدار کاربید تنگستن، فرآیند متراکم شدن در مرحله فشردن احتمالاً به خوبی صورت نمی‌گیرد. توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده و تجمع آن‌ها در محل‌های مشخصی سبب کاهش میزان تراکم‌پذیری می‌گردد. این عوامل سبب کاهش ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و استحکام فشاری در فولاد تقویت

شده با ۴ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده می‌گردد. این در حالی است که افزایش کاربید تنگستن تاثیر منفی بر روی کرنش نقطه شکست و میزان انرژی جذب شده ایجاد کرده است. به بیان دیگر، با افزایش درصد وزنی ذرات کاربید تنگستن، استحکام فولاد تولید شده افزایش و این در حالی است که شکل‌پذیری و چقرمگی آن کاهش می‌یابد. باید خاطر نشان کرد که در مطالعه کونگ‌کونگ و همکارانش [۴۲]، بهبود هم در استحکام و هم در چقرمگی با افزودن ذرات کاربید تنگستن به کلاف آهنی تولید شده به روش ریخته‌گری توپر گزارش شده است. احتمالاً این اختلاف در نتایج به ترشوندگی بهتر ذرات تقویت‌کننده در روش ریخته‌گری ارتباط پیدا کند. علاوه بر این، در پوشش تولید شده به روش ذوبی نیز ذرات کاربید تنگستن بعد از دگرگونی‌های مختلف می‌توانند سبب بهبود توأمان استحکام و چقرمگی شوند [۴۳]. این احتمال می‌رود که در روش‌های ذوبی در مقایسه با روش متالورژی پودر که در این پژوهش بررسی شده است، ذرات تقویت‌کننده بیشتر توسط مذاب احاطه شوند و چسبندگی بهتر بین ذرات و زمینه سبب بهبود در استحکام و چقرمگی شود.



شکل ۱۰- الف) ضریب کشسانی، ب) استحکام تسلیم، ج) استحکام فشاری، د) کرنش نقطه شکست و ه) میزان انرژی جذب شده برحسب درصد وزنی کاربید تنگستن به عنوان تقویت کننده در فولادهای مرکب.

#### ۴- نتیجه گیری



در این پژوهش، فولادهای تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن به روش متالورژی پودر تولید شده‌اند و تاثیرات افزودن ذرات کاربید تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) بر روی میزان تخلخل، ریزساختار و رفتار فشاری ارزیابی شده و نتایج زیر به دست آمده است.

۱- میزان چگالی نمونه‌های فولادی تفجوشی شده بین ۶۹۲۷/۹ تا  $7101/1 \text{ kg/m}^3$  و درصد تخلخل آن‌ها بین ۱۷/۲۱ تا ۱۹/۴۱ درصد اندازه‌گیری شد.

۲- میزان چگالی نمونه‌های تولید شده تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش پیدا کرد و سپس، در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی تقویت‌کننده افزایش یافت. این مسئله را می‌توان به بالا بودن چگالی کاربید تنگستن ( $\text{kg/m}^3$ ) ۱۵۸۰۰ در مقایسه با چگالی فولاد ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ) مرتبط دانست.

۳- در نمونه‌های حاوی ۰ تا ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن، میزان متراکم شدن در طی فرآیند فشردن و در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن، چگالی ذرات تقویت‌کننده عوامل موثر اصلی بر روی میزان تخلخل به شمار می‌روند.

۴- افزودن ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن به ترتیب حدوداً ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۱۷ درصد بهبود در مقدار سختی نمونه‌های فولاد تقویت شده را نشان داد. این رفتار را می‌توان مرتبط با اثر ممانعت‌کنندگی ذرات کاربیدی بر روی حرکت نابجایی‌ها و جلوگیری از ایجاد تغییرشکل پلاستیک دانست.

۵- با افزایش کاربید تنگستن تا ۲ درصد وزنی، بهبود در رفتار فشاری نمونه‌های تقویت شده مشاهده می‌شود. کاهش تنش و کرنش به صورت هم‌زمان در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده نسبت به نمونه حاوی ۲ درصد وزنی تقویت‌کننده، به بیش از حد بودن ذرات سخت و مستحکم کاربید تنگستن و همچنین تشکیل نواحی کلوخه‌ای این ذرات باز می‌گردد.

## مراجع

[1] M. Otto, J. Freudenberger, L. Giebler, A. Weidner, and J. Hufenbach, "Developing austenitic high-manganese high-carbon steels for biodegradable stent applications: Microstructural and mechanical studies," *Mater. Sci. Eng., A*, vol. 892, p. 145998, 2024.

[2] Y. Cao, Z. D. Wang, J. Kang, D. Wu, and G. D. Wang, "Effects of tempering temperature and Mo/Ni on microstructures and properties of lath martensitic wear-resistant steels," *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 20, pp. 70–76, 2013.

- [3] S. Z. Wei and L. J. Xu, "Review on research progress of steel and iron wear-resistant material," *Acta Metall. Sin.*, vol. 56, pp. 523–538, 2020.
- [4] H. Cheng, X. Luo, and X. Wu, "Recent research progress on additive manufacturing of high-strength low-alloy steels: Focusing on the processing parameters, microstructures and properties," *Mater. Today Commun.*, vol. 36, p. 106616, 2023.
- [5] K. Li, T. Yang, N. Gong, J. Wu, X. Wu, D. Z. Zhang, and L. E. Murr, "Additive manufacturing of ultra-high strength steels: A review," *J. Alloys Compd.*, vol. 965, p. 171390, 2023.
- [6] S. Cao, N. Ma, Y. Zhang, R. Bo, and Y. Lu, "Fabrication, mechanical properties, and multifunctionalities of particle reinforced foams: A review," *Thin-Walled Struct.*, vol. 186, p. 110678, 2023.
- [7] R. Chen, B. Li, and K. Xu, "Effect of particle morphology on fatigue crack propagation mechanism of TiB<sub>2</sub>-reinforced steel matrix composites," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 274, p. 108752, 2022.
- [8] D. Kumar, R. Seetharam, and K. Ponappa, "A review on microstructures, mechanical properties and processing of high entropy alloys reinforced composite materials," *J. Alloys Compd.*, vol. 972, p. 172732, 2024.
- [9] F. L. Han, *Handbook of powder metallurgy*. Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 2012, pp. 987–1019.
- [10] A. Muthuchamy and A. R. Annamalai, "Effect of TiC Addition and Heating Mode on the Electrochemical Response of Powder Metallurgy Processed Corrosion-Resistant Austenitic and Ferritic Steels," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 60, pp. 121–127, 2018.
- [11] Y. Zhang, B. Wang, F. Qiu, H. Yang, and G. C. Barber, "Superior wear resistance of dual-phased TiC–TiB<sub>2</sub> ceramic nanoparticles reinforced carbon steels," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 653–662, 2023.
- [12] C. Tan, W. Ma, C. Deng, D. Zhang, and K. Zhou, "Additive manufacturing SiC-reinforced maraging steel: Parameter optimisation, microstructure and properties," *Adv. Powder Mater.*, vol. 2, no. 1, p. 100076, 2023.

- [13] A. Saxena, K. K. Saxena, V. K. Jain, S. K. Rajput, and B. N. Pathak, "A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites," *Mater. Today: Proc.*, 2023, Art. no. 124568.
- [14] L. B. Niu, X. G. Wang, and Z. M. Fan, "Tribology characteristics of ex-situ and in-situ tungsten carbide particles reinforced iron matrix composites produced by spark plasma sintering," *J. Wuhan Univ. Technol., Mater. Sci. Ed.*, vol. 28, pp. 449–454, 2013.
- [15] B. Li, J. H. Yao, Q. L. Zhang, Z. H. Li, and L. J. Yang, "Microstructure and tribological performance of tungsten carbide reinforced stainless composite coating by supersonic laser deposition," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 275, pp. 58–68, 2015.
- [16] J. Deng and Z. Zhou, "Fabrication, Tensile, and Hardness Properties of Novel Cast WC-Reinforced 304 Stainless Steel Composites," *JOM*, vol. 75, pp. 1294–1305, 2023.
- [17] X. Yan, Y. Zheng, Y. Qiu, G. Qiao, W. Du, H. He, and Q. Bai, "Role of reinforcement on the microstructure of WC reinforced Fe-based composite coating prepared by direct energy deposition," *Mater. Charact.*, vol. 209, p. 113731, 2024.
- [18] X. Yu, X. Bai, X. Shi, X. Zhou, and H. Zhang, "Microstructures and properties of wire and arc additively manufactured steel matrix composites with addition of WC by gravity-driven side powder feeding," *J. Manuf. Processes*, vol. 81, pp. 236–249, 2022.
- [19] H. Bai, L. Kang, W. Zhuang, J. Liu, L. Zhong, and Y. Xu, "Microstructure and mechanical properties of W-WC/Fe composite fiber-reinforced Fe matrix composite prepared by combination of infiltration and in-situ solid phase diffusion," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 27, pp. 5305–5314, 2023.
- [20] F. Zhang, W. Zhao, W. Zhang, Z. Liao, X. Xiang, H. Gou, Z. Li, H. Wei, X. Wu, and Q. Shan, "Microstructure, mechanical properties and wear resistance of rare earth doped WC/steel matrix composites: Experimental and calculations," *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 2, pp. 2638–2647, 2023.
- [21] A. Guo, R. Tang, S. Guo, Y. Hu, X. Sheng, Y. Zhang, M. Zhang, P. Qu, and S. Wang, "Acoustic field-assisted powder bed fusion of tungsten carbide-reinforced 316L stainless steel composites," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 26, pp. 5488–5502, 2023.

- [22] I. D. Olumor, M. Wiśniewska, E. Torresani, and E. A. Olevsky, "Additive manufacturing and spark plasma sintering as effective routes for manufacturing of AISI 316L austenitic stainless steel - WC composites," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 26, pp. 3234–3244, 2023.
- [23] Z. Liao, X. Huang, F. Zhang, Z. Li, S. Chen, and Q. Shan, "Effect of WC mass fraction on the microstructure and frictional wear properties of WC/Fe matrix composites," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 114, p. 106265, 2023.
- [24] X. Yan, C. Chen, R. Zhao, W. Ma, R. Bolot, J. Wang, Z. Ren, H. Liao, and M. Liu, "Selective laser melting of WC reinforced maraging steel 300: Microstructure characterization and tribological performance," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 371, pp. 355–365, 2019.
- [25] H. Sazegaran, "Investigation on Production Parameters of Steel Foam Manufactured Through Powder Metallurgical Space Holder Technique," *Met. Mater. Int.*, vol. 27, pp. 3371–3384, 2021.
- [26] H. Sazegaran and M. Hojati, "Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams," *Int. J. Miner., Metall., Mater.*, vol. 26, pp. 588–596, 2019.
- [27] J. Park, S. Lee, S. Kang, J. Jeon, S. H. Lee, H. Kim, and H. Choi, "Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels," *Powder Technol.*, vol. 284, pp. 459–466, 2015.
- [28] V. S. Warke, R. D. Sisson, and M. M. Makhoulf, "The effect of porosity on the austenite to ferrite transformation in powder metallurgy steels," *Mater. Sci. Eng., A*, vol. 528, no. 10-11, pp. 3533–3538, 2011.
- [29] J. Park, S. Lee, S. Kang, J. Jeon, S. H. Lee, H. Kim, and H. Choi, "Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels," *Powder Technol.*, vol. 284, pp. 459–466, 2015.

[۳۰] حمید سازگاران، زهرا ولی پور و فرهاد خرمشاهی، اثر میزان کاربید تنگستن بر درصد تخلخل، ریزساختار و رفتار مکانیکی فوم فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر با استفاده از فضا ساز، مهندسی متالورژی، دوره ۲۳، شماره ۲، ۱۳۹۹، ۱۴۲-۱۵۳.

- [31] M. Hojati, C. Gierl-Mayer, and H. Danninger, "Impact Fracture Behaviour of Powder Metallurgy Steels Sintered at Different Temperatures," *Berg Huettenmaenn. Monatsh.*, vol. 169, pp. 132–139, 2024. doi: 10.1007/s00501-024-01428-w.
- [32] B. S. Rao and T. B. Rao, "Effect of Process Parameters on Powder Bed Fusion Maraging Steel 300: A Review," *Laser Manuf. Mater. Process.*, vol. 9, pp. 338–375, 2022. doi: 10.1007/s40516-022-00182-6.
- [33] Y. G. Dorofeev, V. V. Mural', V. T. Prutsakov, et al., "Diffusion of carbon in iron specimens produced by dynamic hot pressing," *Powder Metall. Met. Ceram.*, vol. 11, pp. 792–795, 1972. doi: 10.1007/BF00844703.
- [34] A. Wanalerkngam et al., "The effect of sintering temperature on properties of Fe-Cr-C alloy," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1137, p. 012029, 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1137/1/012029.
- [35] H. Palmour, I. Simonsen, and H. Stadelmaier, "The Eutectoids in Iron-Carbon Alloys Prepared by Powder Metallurgy," *Int. J. Mater. Res.*, vol. 80, no. 8, pp. 563–565, 1989. doi: 10.1515/ijmr-1989-800806.
- [36] E. Pagounis and V. K. Lindroos, "Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites," *Mater. Sci. Eng., A*, vol. 246, no. 1-2, pp. 221–234, 1998. doi: 10.1016/S0921-5093(97)00710-7.
- [37] A. Saxena, K. K. Saxena, V. K. Jain, S. K. Rajput, and B. N. Pathak, "A review of reinforcements and process parameters for powder metallurgy-processed metal matrix composites," *Mater. Today: Proc.*, 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.227.
- [38] F. Velasco, N. Antón, and J. M. Ruiz-Prieto, "Mechanical and corrosion behaviour of powder metallurgy stainless steel based metal matrix composites," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 10, pp. 847–856, 1997. doi: 10.1179/mst.1997.13.10.847.
- [39] A. M. Sankhla, K. M. Patel, M. A. Makhesana, K. Giasin, D. Y. Pimenov, S. Wojciechowski, and N. Khanna, "Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 282–292, 2022.
- [40] S. Jeon, X. Liu, C. Azersky, J. Ren, S. Zhang, W. Chen, R. W. Hyers, K. Costa, M. Kolbe, and D. M. Matson, "Particle size effects on dislocation density,

microstructure, and phase transformation for high-entropy alloy powders," *Materialia*, vol. 18, p. 101161, 2021.

[41] B. Niu, J. Chen, Y. Yi, L. Pan, X. Zou, J. Yi, and Y. Hu, "The Effect of Thermal Inputs on Microstructure and Corrosion Resistance of WC Particle-Reinforced High Chromium Wear-Resistant Steel," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 16, no. 7, p. 210766, 2021.

[42] C. Ren, N. Zhao, M. Li, R. Shan, Y. Xu, Z. Cui, and L. Zhong, "Preparation and formation mechanism of (W) WC/Fe bundle reinforced iron matrix composites," *Ceram. Int.*, vol. 50, no. 11, pp. 19 573–19 582, 2024.

[43] X. Yan, Y. Zheng, Y. Qiu, G. Qiao, W. Du, H. He, and Q. Bai, "Role of reinforcement on the microstructure of WC reinforced Fe-based composite coating prepared by direct energy deposition," *Mater. Charact.*, vol. 209, p. 113731, 2024.