

## ارزیابی تأثیر دمای پیرسازی بر نوع شکست و مکانیسم سایش در فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد

مربی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران  
دانشیار، گروه بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران  
مسعود سبزی\*  
منصور فرزام

### چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر دمای پیرسازی بر نوع شکست و مکانیسم سایش در فولاد هادفیلد پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا پنج بلوک از فولاد هادفیلد ریخته‌گری شدند. سپس هر پنج بلوک تحت عملیات حرارتی آستنیت‌دهی در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و بلافاصله در آب خالص سریع سرد شدند. سپس یک بلوک در شرایط آستنیت‌دهی شده باقی مانده و چهار بلوک دیگر تحت عملیات حرارتی پیرسازی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت قرار گرفتند. در مرحله‌ی بعد، آزمایش‌های کشش تک‌محوره، سختی‌سنجی به روش ویکرز و سایش به روش پین روی دیسک بر روی هر پنج نمونه انجام شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و برای بررسی سطوح شکست و مکانیسم سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. مشاهدات میکروسکوپ نوری نشان داد که افزایش دمای پیرسازی منجر به افزایش میزان رسوبات کاربیدی و کاهش اندازه دانه‌های آستنیت در ریزساختار فولاد هادفیلد می‌شود. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که افزایش دمای پیرسازی منجر به افزایش سختی، استحکام و مقاومت به سایش فولاد هادفیلد شده، ولی در عوض کرنش شکست آن را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست و سایش نشان داد که افزایش دمای پیرسازی منجر به ایجاد شکست ترد شده و در تمام نمونه‌های پیرسازی شده، سایش چسبان اتفاق می‌افتد.  
واژه‌های کلیدی: فولاد هادفیلد، دمای پیرسازی، مکانیسم سایش، نوع شکست، ریزساختار.

## Effect of Aging Temperature on the Fracture Mode and Wear Mechanism in the Hadfield Austenitic Manganese Steel

M. Sabzi  
M. Farzam

Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran  
Department of Technical Inspection, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran

### Abstract

In this study, aging temperature effect on the fracture mode and wear mechanism of the Hadfield steel was investigated. For this purpose, 5 blocks were casted from Hadfield steel. After the casting, all blocks austenitized in  $1100^{\circ}\text{C}$  for 2 hours and immediately quenched in the pure water. Then, one block at austenitising conditions remained and four other blocks the aging heat treatment in  $450^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $550^{\circ}\text{C}$  and  $600^{\circ}\text{C}$  for 1 hours. In the next step, uniaxial tensile, hardness measuring by Vickers method and wear by pin-on-disk method tests were applied on them. To evaluation of the microstructures was conducted by optical microscopy and the fractured surfaces and wear mechanism were observed by scanning electron microscopy. Optical microscopy observations showed that the aging heat treatment temperature increase, leads to increases carbide precipitates and decreasing austenite grains size in the Hadfield steel microstructure. The results of mechanical tests showed that aging temperature increase lead to increase in hardness, strength and wear resistance of Hadfield steel, but in return reduces fracture strain. Also, scanning electron microscopy images from wear and fractured surfaces showed that aging temperature increase lead to the creation of brittle fracture and in all aged samples sticky wear took place.

**Keywords:** Hadfield steel, aging temperature, wear mechanism, fracture mode, microstructure.

سختی در این فولاد نتایج بسیار مثبتی به جای گذاشته است [۲].  
اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده [۴ و ۳] ولی از طرفی هم با ایجاد کاربیدهای TiC، باعث کاهش انعطاف‌پذیری آن می‌شود [۵]. در تحقیقات دیگری اسری و استاوا و داس<sup>۱</sup> [۶]، گزارش نمودند که با طراحی کامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از فولاد هادفیلد و ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم، می‌توان مقاومت به سایش فولاد هادفیلد را بهبود بخشید. در همین زمینه، اسری و استاوا و همکارانش [۷]، به بررسی تأثیر ذرات کاربید تیتانیم بر رفتار خوردگی کامپوزیت‌های با زمینه فولاد هادفیلد پرداختند. این محققان نشان دادند که با افزایش میزان کاربید تیتانیم، مقاومت خوردگی کامپوزیت مذکور کاهش می‌یابد.  
خیاط و همکارانش [۸] به بررسی تأثیر آلومینیوم بر خواص و ریزساختار فولاد هادفیلد پرداختند و دریافتند که افزودن آلومینیوم به

### ۱- مقدمه

اولین فولاد آستنیتی منگنزدار که دارای حدود ۱٫۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد<sup>۱</sup> در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، کربن ۱٫۴-۱ درصد وزنی و منگنز ۱۴-۱۰ درصد وزنی می‌باشد که از قابلیت کارسختی بالایی برخوردار بوده و دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش است. این فولاد با استحکام بالا، انعطاف‌پذیری خوب و مقاومت عالی در برابر سایش بصورت گسترده در صنایع مختلف نظیر صنایع سیمان، معدن، راهسازی و راه‌آهن بکار گرفته می‌شود [۱]. در موارد خاص بنا به کاربرد آن، عناصر آلیاژی دیگری نیز به این فولاد اضافه می‌شود. یکی از این عناصر تیتانیم می‌باشد. استفاده از عنصر تیتانیم جهت ریزدانه‌کردن ساختار و افزایش

<sup>2</sup> Srivastava and Das

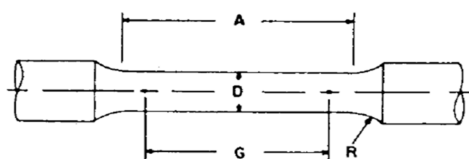
<sup>1</sup> Robert Hadfield  
\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mas.metallurg88@gmail.com

شده و سپس ترکیب شیمیایی آنها توسط دستگاه طیف سنجی نشری جرقه‌ای ساخت کشور آلمان بررسی گردید. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی بلوک‌های ریخته‌گری شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هر بلوک بصورت استوانه و با وزن ۱۵ کیلوگرم ریخته‌گری شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی بلوک‌های تولید شده (برحسب درصدوزنی) و مقایسه‌ی آن با استاندارد ASTM A-128

| عنصر       | کربن  | منگنز | سیلیسیم | گوگرد   | آهن  |
|------------|-------|-------|---------|---------|------|
| میزان      | ۱/۲۵  | ۱۲/۷۱ | ۰/۲۵    | ۰/۰۱۷   | بقیه |
| ASTM A-128 | ۱-۱/۴ | ۱۰-۱۴ | ۱Max    | ۰/۰۷Max | بقیه |

سپس هر پنج بلوک تحت عملیات حرارتی آستنیت‌دهی در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و بلافاصله در آب سریع سرد شدند. سپس یک بلوک در شرایط آستنیت‌دهی باقی مانده و چهار بلوک دیگر تحت عملیات حرارتی پیرسازی در دمای  $550$ ،  $500$ ،  $450$  و  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت قرار گرفتند. برای بررسی ریزساختار، نمونه‌های متالوگرافی پس از آماده‌سازی توسط محلول نایتال ۲ درصد حکاکی شدند. سپس ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اندازه‌های نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت‌دهی و نمونه‌های پیرسازی شده از نرم افزار Image Analyzer و برای بررسی میزان کاربیدهای آنها از نرم‌افزار Image J بصورت جداگانه استفاده شد. همچنین برای بررسی تأثیر عملیات پیرسازی بر فازهای تشکیل شده در ساختار، از نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت‌دهی و نمونه‌های پیرسازی در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$ ، از پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> استفاده گردید. برای بررسی سختی، از هر پنج نمونه‌ی مورد آزمایش بعد از عملیات‌های آستنیت‌دهی و پیرسازی، براساس استاندارد ASTM E ۹۲-۸۲ [۱۹]، آزمایش سختی سنجی با استفاده از دستگاه INSTRON انجام شد. همچنین بعد از عملیات آستنیت‌دهی و پیرسازی، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش کشش، توسط دستگاه تراش CNC مطابق با استاندارد ASTM E۸ [۲۰] تراشکاری شدند (شکل ۱). لازم به ذکر است که آزمایش کشش تک محوره توسط دستگاه SANTAM مدل ASTM-۴۰۰ در دمای اتاق و با نرخ کرنش  $10^{-2}\text{S}^{-1}$  انجام شد.



| کد | اندازه (میلیمتر) |
|----|------------------|
| G  | $36 \pm 0.1$     |
| D  | $9 \pm 0.1$      |
| R  | Min 8            |
| A  | Min 45           |

شکل ۲- ابعاد نمونه‌ی کشش مطابق با استاندارد ASTM E۸

فولاد هادفیلد، منجر به کاهش کاربیدهای مرزدانه‌ای در ساختار ریختگی شده و مورفولوژی کاربیدها را از حالت پیوسته خارج کرده و به شکل منقطع تبدیل می‌کند. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که افزایش مقدار آلومینیوم در فولادهای منگنزی، نیروی محرکه لازم برای انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت را در این فولادها افزایش داده و از طرفی دمای تشکیل مارتنزیت را کاهش می‌دهد [۹].

فولاد هادفیلد به دلیل دارا بودن مقدار کربن بالا، ساختار آن در حالت ریختگی، شامل دانه‌های آستنیت و رسوب‌های کاربید مرزدانه‌ای است که در این حالت ترد و شکننده بوده و به نوعی غیرقابل استفاده هستند. برای رفع این مشکل حسینی و همکارانش [۱۱ و ۱۰] گزارش نمودند که با سریع سردی فولاد هادفیلد در حمام آب نمک پس از عملیات حرارتی آستنیت‌دهی، می‌توان از تشکیل بیش از حد ذرات کاربیدی در این فولاد جلوگیری نمود.

از آنجا که یکی از دلایل اصلی کاربرد فولاد هادفیلد بویژه در مته حفاری به خاطر مقاومت به سایش بالای آن می‌باشد، تعدادی از محققین در تحقیقات جداگانه‌ای به بررسی خواص سایشی فولاد هادفیلد پرداختند. مقدم و همکارانش [۱۲]، گزارش دادند که افزودن وانادیوم به فولادهای منگنزی، باعث افزایش مقاومت به سایش آنها نسبت به فولاد منگنزدار هادفیلد می‌شود که دلیل این رخداد، تشکیل ذرات کاربید وانادیوم گزارش شده است. تعدادی دیگر از محققین [۱۵ - ۱۳] به مقایسه خواص و ساختار فولاد هادفیلد و آلیاژهای آهن - کروم پرداختند و نتایج آنها نشان می‌دهد که فولاد هادفیلد از سختی پایین‌تری برخوردار می‌باشد.

در تحقیقات دیگری عباسی و همکارانش [۱۶]، به بررسی تأثیر آلومینیوم بر نوع شکست و قابلیت تغییر شکل پلاستیک فولاد منگنزدار هادفیلد پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد و افزایش انرژی نقص چیدمان، اکتیویته‌ی نسبی دوقلوبی در مقایسه با لغزش کاهش می‌یابد، اما شکستی که در فولاد هادفیلد با و بدون آلومینیوم رخ می‌دهد، شکست نرم می‌باشد. از طرفی دیگر با افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد، میزان ازدیاد طول نسبی و استحکام کششی نیز کاهش می‌یابد. در همین زمینه عباسی و همکارانش [۱۷]، گزارش دادند که افزودن آلومینیوم به ترکیب شیمیایی فولاد هادفیلد منجر به بهبود مقاومت به سایش فولاد مذکور شده و همچنین باعث ایجاد سایش خستگی در مسافت‌های طولانی در فولاد هادفیلد می‌شود.

باتوجه به اینکه تخریب قطعات ساخته شده از جنس فولاد هادفیلد در شرایط سرویس‌دهی بسیار پرهزینه است (نظیر قطعات بکار رفته در خطوط ریلی)، لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی تأثیر دمایی پیرسازی بر نوع شکست و مکانیسم سایش در فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده است.

## ۲- روش تحقیق

آلیاژ آهن - منگنز مورد استفاده در این تحقیق، فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۱۸] بود. برای تهیه‌ی این فولاد، پنج بلوک از فولاد هادفیلد توسط کوره القایی بدون هسته ریخته‌گری

<sup>۱</sup> X-Ray Diffraction (XRD)

مرزدانه‌ها را گرفته و باعث کوچک شدن دانه‌ها در ریزساختار می‌شوند [۲ و ۳ و ۵].

برای بررسی اندازه دانه‌ها در نمونه‌های آستنیت‌شده و پیرسازی شده، اندازه‌ی دانه‌ها توسط نرم افزار Image Analyzer محاسبه شده و بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری مشخص گردیده است. لازم به ذکر است که در نمونه‌های پیرسازی شده، بدلیل افزایش تعداد دانه‌ها، اندازه‌ی چند دانه با نرم‌افزار محاسبه شده و در نهایت میانگین آنها بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری گزارش شده است. بررسی اندازه دانه‌ها توسط نرم‌افزار نشان از این دارد که افزایش دما در فرآیند پیرسازی فولاد هادفیلد منجر به کاهش اندازه‌ی دانه‌ها از ۱۳۶/۵ (در شرایط آستنیت‌شده) به ۵۳/۷ میکرومتر (در شرایط پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C) کاهش می‌یابد. درنهایت ریزساختارهای مشاهده شده توسط میکروسکوپ نوری نشان از این دارد که افزایش دمای پیرسازی در فولاد هادفیلد، باعث افزایش میزان کاربیدها و ریزشدن دانه‌های آستنیت در ساختار می‌گردد.

پس از پایان آزمایش کشش، سطح شکست نمونه‌های نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت‌شده و نمونه‌های پیرسازی در دماهای ۴۵۰°C و ۶۰۰°C توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> مطالعه شد. آزمایش سایش با استفاده از روش پین روی دیسک در دمای محیط، بدون روانکار و در شرایط سایش آرام با نیروی عمودی ۳۵ نیوتن و سرعت خطی ۰/۴۵ متر بر ثانیه انجام شد. در این آزمایش پین از جنس فولاد بلبیرینگ<sup>۲</sup> با سختی ۷۰ راکول C، بصورت استوانه‌ای و با قطر ۱۰mm و طول ۴cm بود. همچنین دیسک از جنس فولاد هادفیلد در شرایط عملیاتی آستنیت‌شده و پیرسازی شده، با قطر ۱۵cm و ضخامت ۲cm بود. دستگاه مورد استفاده برای آزمایش سایش مجهز به سیستم ثبت تعداد دورموتور و نیروی سایش بود. برای اندازه‌گیری میزان کاهش وزن دیسک مورد آزمایش در مسافت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰m از ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۱mg استفاده گردید. در پایان آزمایش سایش، برای مطالعه‌ی سطوح تحت سایش نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت‌شده و نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای ۴۵۰°C و ۶۰۰°C، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید.

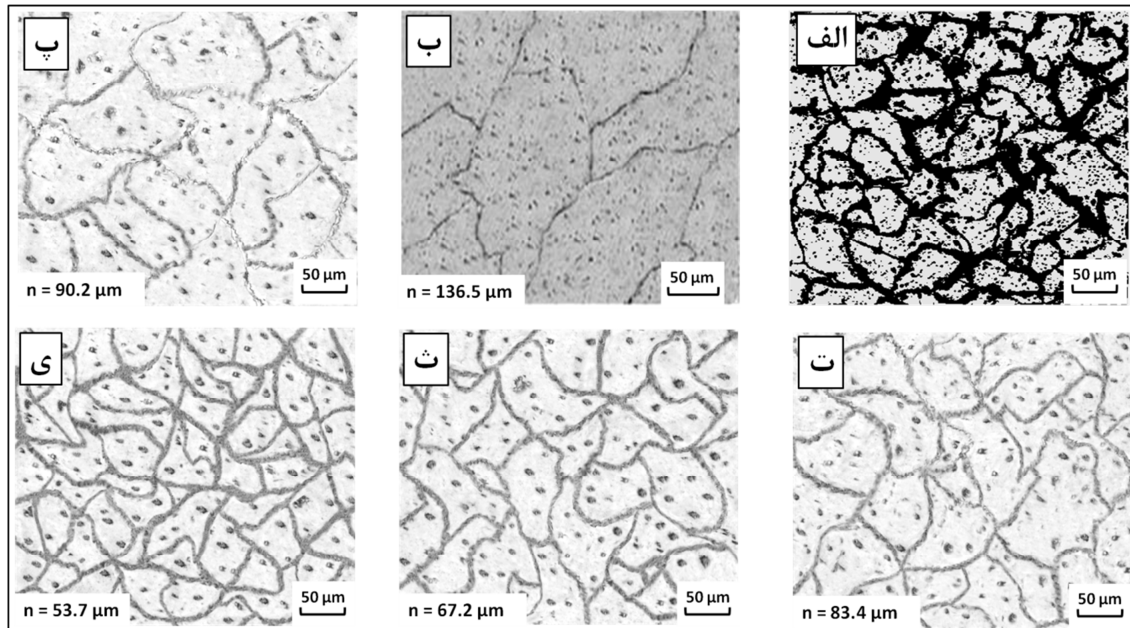
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشاهدات ریزساختاری

شکل ۲، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فولاد هادفیلد مورد استفاده در این پژوهش را در شرایط مختلف ریخته‌گری و عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت ریخته‌گری، ریزساختار متشکل از یک زمینه آستنیتی و مقدار زیادی کاربید پیوسته در مرزدانه‌ها می‌باشد. حضور کاربید به دلیل حضور کربن زیاد و عناصر کاربیدزا می‌باشد. وجود زمینه‌ی آستنیتی بدلیل حضور کربن و منگنز زیاد در ترکیب است. محققان [۲۱]، گزارش دادند که با افزایش منگنز در آلیاژهای Fe-Mn، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، بطوریکه در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه‌ی کاملاً آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. با انجام عملیات آستنیت‌شده، مشاهده می‌شود که اندازه دانه‌های آستنیت نسبت به حالت ریخته‌گری بزرگتر شده و از میزان کاربیدها کاسته شده است. این امر بدلیل آن است که دمای بالایی که در طی عملیات حرارتی آستنیت‌شده بکار گرفته شده، منجر به انحلال کاربیدها و متعاقباً افزایش اندازه دانه‌های آستنیت شده است [۱۰ و ۱۱]. باتوجه به شکل ۲، تصاویر میکروسکوپ نوری به خوبی گویای این واقعیت است که با افزایش دمای پیرسازی از ۴۵۰ به ۶۰۰°C، میزان کاربیدها افزایش و اندازه دانه‌های آستنیت کاهش می‌یابد. دلیل این اتفاق آن است که نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C در دمای بالاتری تحت عملیات پیرسازی قرار گرفته است و به دلیل بالا بودن دمای عملیات پیرسازی، عناصر کاربیدزای موجود در ترکیب این فولاد، نظیر آهن و منگنز، شرایط مورد نیاز برای واکنش با کربن را داشته و کربن را از آستنیت جدا کرده و ساختار ریزدانه‌تری را در این نمونه ارائه داده‌اند. چرا که ذرات کاربیدی جلوی حرکت

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

<sup>2</sup> Ball Bearings



شکل ۲- تصاویر متالوگرافی فولاد هادفیلد در بزرگنمایی ۱۰۰ در شرایط: الف) ریخته‌گری، ب) آستنیت‌ده شده در دمای ۱۱۰۰°C، پ) پیرسازی شده در دمای ۴۵۰°C، ت) پیرسازی شده در دمای ۵۰۰°C، ث) پیرسازی شده در دمای ۵۵۰°C، ی) پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C

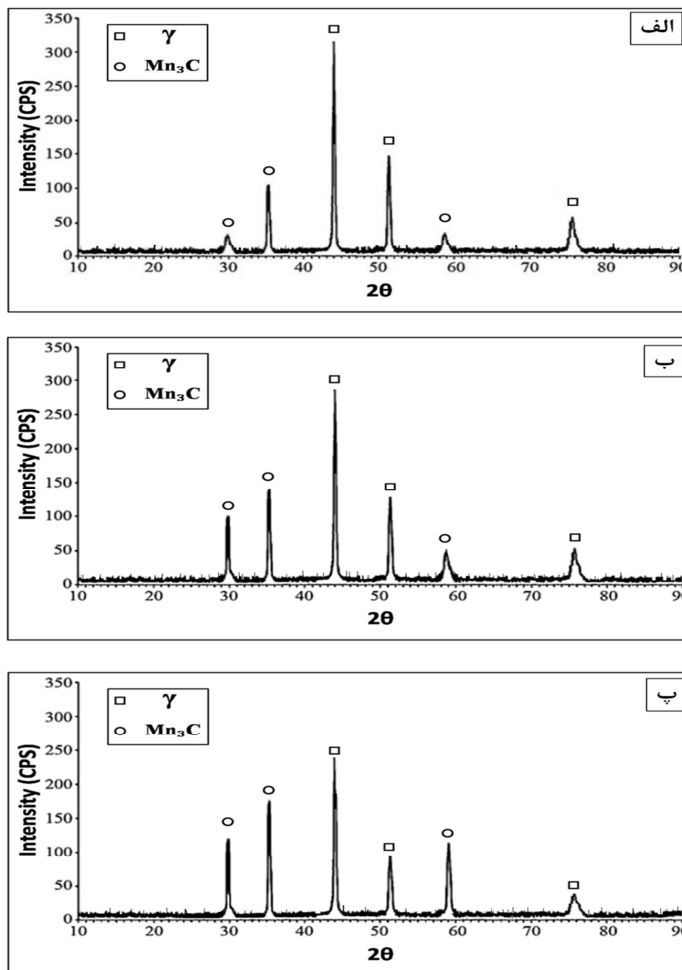
جدول ۲- تعیین میزان کاربید در نمونه‌های مورد مطالعه توسط نرم‌افزار

| میزان کاربید |       | نمونه                         |
|--------------|-------|-------------------------------|
| انحراف معیار | درصد  |                               |
| ۱,۹۲         | ۱۴,۲۹ | نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت |
| ۱,۰۷         | ۲۳,۸۳ | پیرسازی شده در دمای ۴۵۰°C     |
| ۱,۵۴         | ۲۹,۶۶ | پیرسازی شده در دمای ۵۰۰°C     |
| ۱,۲۲         | ۳۲,۷۱ | پیرسازی شده در دمای ۵۵۰°C     |
| ۱,۰۲         | ۳۶,۸۸ | پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C     |

برای بررسی بهتر میزان کاربیدها در هر پنج نمونه‌ی عملیات حرارتی شده، از نرم افزار Image J استفاده شده و نتایج این بررسی در جدول ۲ گزارش داده شده است. در این جدول هم مشاهده می‌گردد که نمونه‌های پیرسازی شده نسبت به نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، دارای میزان کاربید بیشتری هستند. همچنین از این جدول مشاهده می‌شود که افزایش دمای پیرسازی منجر به افزایش میزان رسوبات در ریزساختار فولاد هادفیلد می‌شود. در واقع از جدول ۲ ملاحظه می‌گردد که نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C و نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، بترتیب بیشترین و کمترین میزان رسوب را در نمونه‌های عملیات حرارتی شده دارند.

### ۲-۳- آنالیز فازی

در شکل ۳ الگوهای XRD از نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای ۴۵۰°C و ۶۰۰°C نشان داده شده است. الگوهای XRD بیانگر وجود فاز آستنیت و کاربیدهای منگنز از نوع Mn<sub>۳</sub>C در ساختار نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای ۴۵۰°C و ۶۰۰°C می‌باشد. باتوجه به بررسی‌های انجام شده بوسیله‌ی میکروسکوپ نوری، مشاهده گردید که افزایش میزان رسوبات کاربیدی در اثر افزایش دمای پیرسازی رخ می‌دهد. حال با مشاهده‌ی الگوهای XRD نیز این رخداد متالورژیکی به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. بطوری که شدت پراش پیک مربوط به کاربید Mn<sub>۳</sub>C در نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C، بیشترین مقدار را دارد. همچنین از هر سه الگوی XRD مشاهده می‌گردد که فاز غالب (فاز زمینه) در هر سه نمونه، فاز آستنیت می‌باشد [۱۲ و ۶ و ۲].



شکل ۳- الگوهای XRD نمونه‌ی: الف) نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، ب) پیرسازی شده در دمای ۴۵۰°C، پ) پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C

### ۳-۳- آزمایش سختی

نتایج سختی‌سنجی برای هر پنج نمونه‌ی مورد آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که از این جدول ملاحظه می‌گردد، میزان سختی فولاد آستنیتی منگن‌دار هادفیلد با افزایش دمای پیرسازی از ۴۵۰ به ۶۰۰°C، بطور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین از جدول ۳ ملاحظه می‌گردد که تمام نمونه‌های پیرسازی شده نسبت به نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت از میزان سختی بیشتری برخوردار هستند. دلیل این مشاهدات به وجود ذرات کاربید  $Mn_3C$  در نمونه‌های مختلف بر می‌گردد [۲۲ و ۲۳]. در مشاهدات میکروسکوپ نوری و بررسی الگوهای XRD ملاحظه گردید که با انجام عملیات پیرسازی و حتی با افزایش دما در عملیات پیرسازی، میزان ذرات کاربید  $Mn_3C$  در ریزساختار فولاد هادفیلد افزایش می‌یابد و همین ذرات کاربیدی هم منجر به افزایش سختی شده‌اند. نتایج حاصل شده در آزمایش سختی با نتایج مقدم و همکارانش شباهت دارد [۱۲]. پیش از این هم مقدم و همکارانش گزارش داده بودند که افزایش میزان ذرات کاربید وانادیوم در ریزساختار فولاد منگن‌دار هادفیلد، منجر به افزایش سختی فولاد مذکور می‌شود.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های سختی با حداقل سه بار تکرار

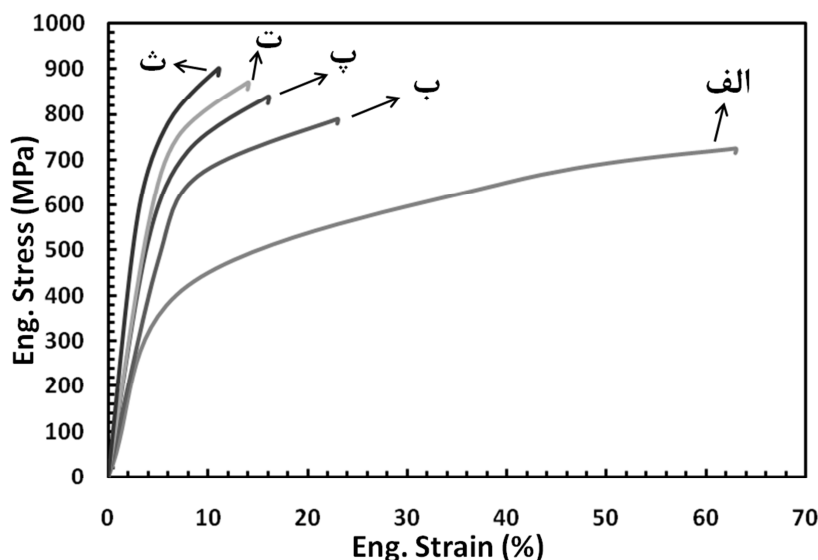
| نمونه                         | میزان کاربید |              |
|-------------------------------|--------------|--------------|
|                               | سختی (HV)    | انحراف معیار |
| نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت | ۱۷۳          | ۳٫۱۹         |
| پیرسازی شده در دمای ۴۵۰°C     | ۲۱۱          | ۳٫۶۱         |
| پیرسازی شده در دمای ۵۰۰°C     | ۲۶۷          | ۲٫۰۴         |
| پیرسازی شده در دمای ۵۵۰°C     | ۳۱۳          | ۴٫۳۸         |
| پیرسازی شده در دمای ۶۰۰°C     | ۳۵۴          | ۳٫۷۳         |

### ۳-۴- آزمایش کشش

در شکل ۴ نتایج مربوط به آزمایش کشش برای هر پنج نمونه‌ی مورد آزمایش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت نسبت به تمام نمونه‌های پیرسازی شده از استحکام تسلیم و کششی کمتر، و چقرمگی و کرنش شکست بیشتری برخوردار است که این نتیجه بدلیل وجود ذرات کاربید  $Mn_3C$  و تعداد دانه‌ی آستنیت بیشتر در نمونه‌های پیرسازی شده حاصل شده است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در بین

کاهش انعطاف پذیری و کرنش شکست می‌گردد [۲۵]. همانطور که در تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده گردید، با افزایش دمای پیرسازی در فرآیند عملیات حرارتی فولاد هادفیلد، اندازه‌ی دانه‌ها کوچکتر و تعداد مرزخانه‌ها بیشتر شده است. مرزخانه‌ها محل‌های پراثری بوده و نایجابی‌های متحرک در هنگام رسیدن به این مکان‌های پراثری متوقف شده و در پشت مرزخانه‌ها تجمع می‌کنند و همین امر منجر به افزایش استحکام می‌گردد. بنابراین افزایش دمای پیرسازی بوسیله‌ی افزایش  $Mn_2C$  و تعداد مرزخانه‌ها منجر به افزایش استحکام و کاهش کرنش شکست در فولاد هادفیلد گردیده است.

نمونه‌های پیرسازی شده، نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}C$  نسبت به دیگر نمونه‌ها از استحکام تسلیم و کششی بالاتر و کرنش شکست پائین‌تر برخوردار است. در واقع بجز نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}C$ ، دیگر نمونه‌های پیرسازی شده دارای منطقه پلاستیک بسیار کوچکی هستند و این موضوع می‌تواند شرایطی را برای وقوع شکست ترد فراهم آورد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده گردید، با افزایش دمای پیرسازی از  $450^{\circ}C$  به  $600^{\circ}C$ ، میزان ذرات کاربید  $Mn_2C$  بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش و اندازه‌ی دانه‌های آستنیت کاهش می‌یابد. کوچک شدن اندازه‌ی دانه‌ها منجر به افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی شده [۲۴] و افزایش میزان ذرات کاربیدی منجر به



شکل ۴- نمودار تنش - کرنش مهندسی حاصل از آزمایش کشش برای نمونه‌ی: الف) نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، ب) پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}C$ ، پ) پیرسازی شده در دمای  $500^{\circ}C$ ، ت) پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}C$ ، ث) پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}C$

کشش مواد نرم، مکانیسم جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها است. این نوع شکست که به شکست فنجان - مخروط<sup>۲</sup> معروف است، مهمترین مکانیسم در شکست مواد نرم به شمار می‌آید. اما با مقایسه‌ی سطح شکست نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}C$ ، ملاحظه می‌گردد که نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت دارای سطح شکستی نرم‌تر (دیپمل‌های عمیق‌تر) می‌باشد که این مشاهدات با نتایج حاصل از آزمایش کشش مطابقت دارد.

اما در نمونه‌ی پیرسازی شده در دماهای  $600^{\circ}C$ ، سطح شکست مشاهده شده صاف بوده که نشان از شکست ترد اتفاق افتاده در این نمونه می‌باشد. زیرا در این نمونه میزان رسوبات کاربیدی در ساختار و بویژه در مرزخانه‌ها بیشتر بوده و همین امر هم باعث شده است که دچار شکست ترد گردد. با مقایسه‌ی تصاویر سطح شکست هر دو نمونه‌ی پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}C$  و  $600^{\circ}C$ ، مشاهده می‌شود که سطح شکست نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}C$  نسبت به

### ۳-۵- بررسی نوع شکست

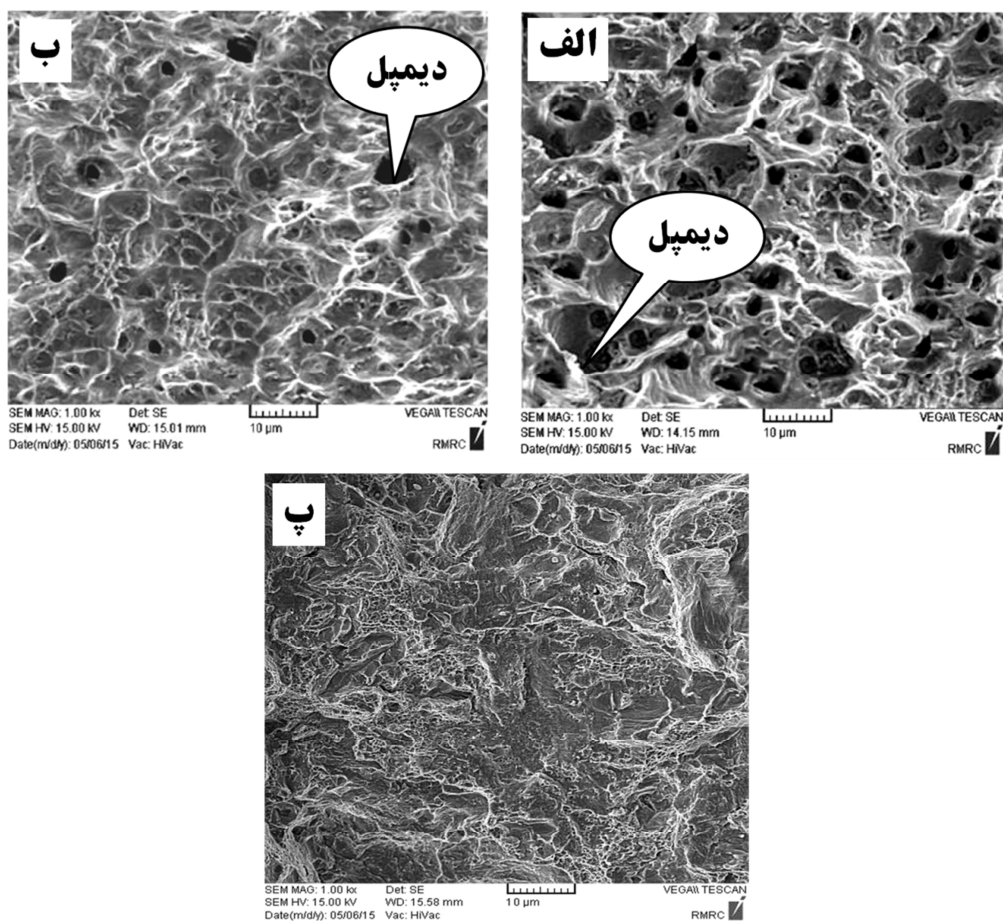
پس از آزمایش کشش مشخص شد که نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت دارای بالاترین چقرمگی و کرنش شکست بوده و در بین نمونه‌های پیرسازی شده، نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}C$  از بالاترین استحکام تسلیم و کششی برخوردار بوده و دارای کمترین ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. لذا پس از آزمایش کشش برای بررسی تأثیر دمای پیرسازی بر نوع شکست فولاد هادفیلد، از سطح شکست نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و سطح شکست نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}C$  و  $600^{\circ}C$  توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}C$  دارای مشخصه‌ی شکست نرم (سطح دیپملی<sup>۱</sup>) می‌باشند. دلیل این امر آن است که زمینه‌ی غالب در این نمونه‌ها آستنیت بوده و آستنیت هم یک فاز نرم می‌باشد. مکانیسم شکست نرم در آزمایش

<sup>۲</sup> Cup & Cone

<sup>۱</sup> Dimpled Surface

ملاحظه می‌گردد که نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت که دارای میزان ذرات رسوبی کمتری نسبت به نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  است، دارای سطح شکستی نرم‌تر و با تعداد دیپیل بیشتر است که نشان از چقرمگی بالاتر این نمونه دارد. در واقع مشاهدات سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش با نتایج حاصل از آزمایش کشش مطابقت دارد. همچنین شکست نگاری نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، نشان می‌دهد که در سطح شکست این نمونه، ریزحفره‌های ثانویه در فضای بین دیپیل‌های اولیه حضور دارند که می‌توانند شکست را به تأخیر ببانند. این ریزحفره‌ها در اثر برهمکنش و برخورد لایه‌های میکروذوقلویی و نیز ایجاد نانورسوبات کربیدی در اثر پیرسازی کرنشی دینامیکی می‌توانند ایجاد شوند [27].

سطح شکست نمونه‌ی پیرسازی شده در دما  $600^{\circ}\text{C}$  دارای مشخصه شکست نرم (سطح دیپیلی) بوده که نشان از این دارد که افزایش دمای پیرسازی منجر به تغییر نوع شکست فولاد هادفیلد از نرم به ترد می‌شود. همچنین با مقایسه‌ی نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت با نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، می‌توان نتیجه گرفت که عملیات حرارتی پیرسازی استعداد به شکست ترد در فولاد هادفیلد را افزایش می‌دهد و این امر در دماهای بالای پیرسازی با احتمال بالایی رخ می‌دهد. باتوجه به اینکه کاهش کسر حجمی ذرات رسوبی و پراکنده و افزایش فاصله‌ی این ذرات به عنوان یک فرآیند ذاتی در جهت چقرمه‌کردن آلیاژهای مهندسی عمل می‌کند [26]، حال با مشاهده‌ی سطوح شکست نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$



شکل ۵- تصاویر SEM پس از آزمایش کشش از سطح شکست نمونه‌ی: الف) نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، ب) پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، پ) پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$

نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  الی  $600^{\circ}\text{C}$ ، از مقاومت به سایش کمتری برخوردار هستند. زیرا نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت نسبت به نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  از میزان کاربید کمتر و استحکام تسلیم پایین‌تری برخوردار است. نمونه‌های پیرسازی شده نسبت به نمونه‌ی نگه‌داشته شده در

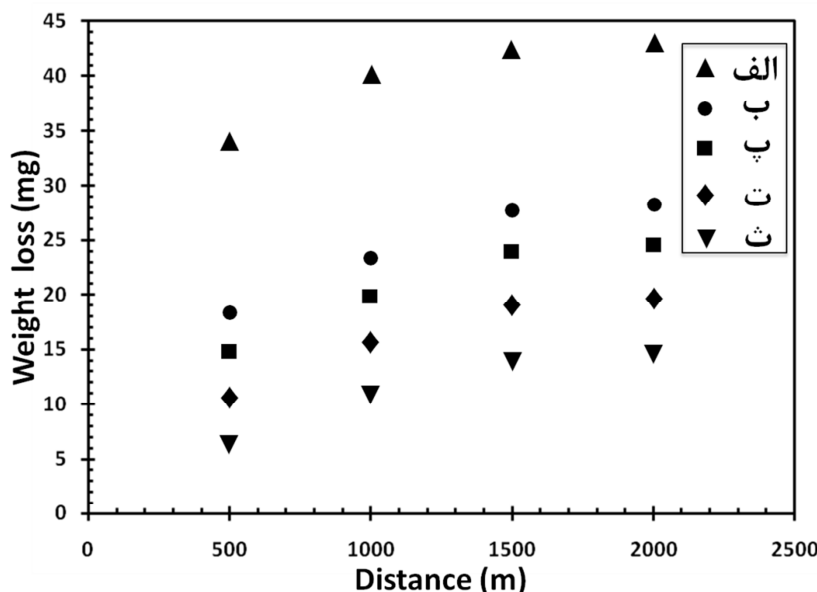
### ۶-۳- آزمایش سایش

در شکل ۶ نتایج مربوط به آزمایش سایش در شرایط سایش آرام، برای نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۶ ملاحظه می‌شود، نمونه‌ی نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت نسبت به

واستاوا و داس [۶] شباهت دارد. این محققین پیش از این در تحقیقات جداگانه‌ای گزارش داده بودند که افزایش میزان کاربیدها در ریزساختار فولاد منگن‌دار هادفیلد منجر به افزایش مقاومت به سایش این فولاد می‌شود.

با مشاهده‌ی شکل ۶، ملاحظه می‌گردد که میزان کاهش وزن در ابتدای آزمایش سایش (۱۰۰۰-۵۰۰ m) در هر پنج نمونه بالا بوده و در انتهای آزمایش و با افزایش مسافت طی شده (۲۰۰۰-۱۵۰۰ m)، میزان وزن از دست رفته کاهش می‌یابد. این امر بدلیل پدیده‌ی کارسختی در فولاد هادفیلد می‌باشد. در واقع در ابتدای آزمایش، سایش زیادی اتفاق افتاده و سپس با طی مسافت‌های بیشتر و تغییر شکل پلاستیک سطح، سطح کارسخت شده و این امر منجر به بهبود مقاومت به سایش فولاد هادفیلد می‌شود [۶ و ۳].

شرایط آستنیت، حاوی مقادیر کاربید بالاتری بوده و در نتیجه از سختی بالاتری برخوردار هستند. همچنین یک رابطه‌ی مستقیم بین سختی و مقاومت به سایش وجود دارد [۵ و ۳]. کاربیدها ذرات سختی هستند که به عنوان مانعی در برابر حرکت جسم ساینده عمل می‌کنند. لذا هرچقدر میزان ذرات کاربیدی (کاربید منگنز) در زمینه (آستنیت) بیشتر باشد، مقاومت بیشتری از فولاد هادفیلد در مقابل سایش دیده می‌شود [۶ و ۳]. از طرفی با مشاهده‌ی نتایج آزمایش سایش برای نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$ ، بازم مشاهده می‌شود که نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  از مقاومت به سایش بالاتری برخوردار است که دلیل این رخداد هم به تشکیل میزان کاربید بیشتر در نمونه‌ی پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  و همچنین استحکام تسلیم بیشتر آن نمونه برمی‌گردد. نتایج حاصل از آزمایش سایش با نتایج حاصل از تحقیقات مقدم [۱۲]، اسری



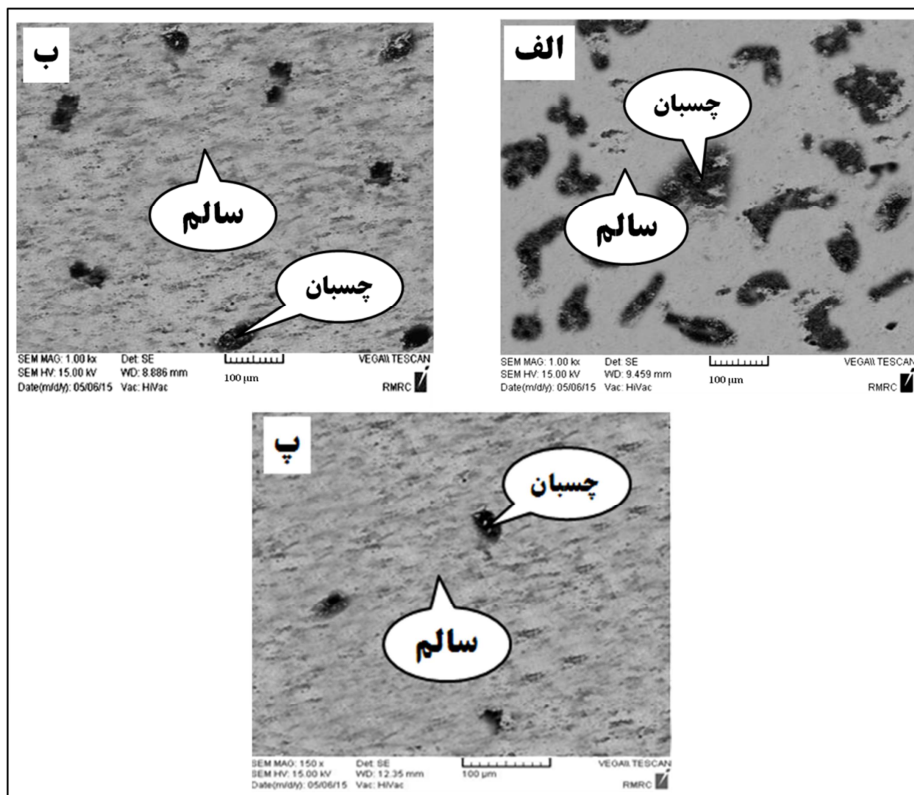
شکل ۶- کاهش وزن برحسب فاصله‌ی طی شده برای نمونه‌ی الف) نکه‌داشته شده در شرایط آستنیت، ب) پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، پ) پیرسازی شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$ ، ت) پیرسازی شده در دمای  $550^{\circ}\text{C}$ ، ث) پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$

تحت سایش نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$ ، وسعت نواحی چسبان افزایش یافته است که بیانگر مقاومت به سایش بالاتر نمونه‌های پیرسازی شده نسبت به نمونه‌ی نکه‌داشته شده در شرایط آستنیت می‌باشد. همچنین با مقایسه‌ی سطوح تحت سایش نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$ ، ملاحظه می‌گردد که با افزایش دمای پیرسازی از  $450^{\circ}\text{C}$  به  $600^{\circ}\text{C}$ ، وسعت ناحیه‌ی چسبان و سالم به ترتیب کاهش و افزایش یافته که این مشاهدات بیانگر افزایش مقاومت به سایش فولاد منگن‌دار هادفیلد در اثر افزایش دمای پیرسازی می‌باشد. از طرفی دیگر هم مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی با نتایج حاصل از سایش و کشش همخوانی دارد.

### ۳-۷- بررسی مکانیسم سایش

جهت بررسی و تعیین مکانیسم سایش، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح تحت سایش نمونه‌ی نکه‌داشته شده در شرایط آستنیت و نمونه‌های پیرسازی شده در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  تصاویری تهیه شده و در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌گردد، مکانیسم اصلی سایش در هر سه نمونه، مکانیسم سایش چسبان است [۵ و ۴]. در تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، دو ناحیه‌ی تیره و روشن دیده می‌شود که نواحی تیره بیانگر ناحیه چسبان و نواحی روشن بیانگر ناحیه سالم است. با مقایسه‌ی هر سه تصویر ملاحظه می‌شود که در سطح نمونه‌ی نکه‌داشته شده در شرایط آستنیت نسبت به سطوح





شکل ۷- تصاویر SEM از سطوح تحت سایش نمونه‌ی: الف) نگه‌داشته شده در شرایط آستنیت، ب) پیرسازی شده در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، پ) پیرسازی شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$

۳- مشاهدات SEM از سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش کشش مشخص نمود که در درجه اول انجام عملیات پیرسازی در فولاد هادفیلد، استعداد به شکست ترد (سطح براق) را در فولاد مذکور بالا می‌برد و در درجه دوم، افزایش دمای پیرسازی منجر به تغییر نوع شکست فولاد هادفیلد از نرم به ترد می‌شود.

۴- الگوهای پراش پرتو ایکس نشان دادند که در تمام دماهای پیرسازی، کاربیدهای منگنز از نوع  $\text{Mn}_3\text{C}$  در ریزساختار تشکیل شده است. این الگوها همچنین نشان دادند که با افزایش دمای پیرسازی، شدت پیک مربوط به فاز کاربید  $\text{Mn}_3\text{C}$  افزایش می‌یابد.

۵- مشاهدات SEM بیانگر وجود دو ناحیه‌ی سالم و چسبان در سطوح سائیده شده‌ی فولاد هادفیلد بود که در اثر افزایش دمای عملیات حرارتی پیرسازی، وسعت ناحیه سالم و چسبان بترتیب افزایش و کاهش یافته بودند که نشان از افزایش مقاومت به سایش فولاد هادفیلد در اثر افزایش دمای پیرسازی داشت. همچنین تصاویر SEM نشان داد که مکانیسم سایش اتفاق افتاده در فولاد هادفیلد پیرسازی شده در دماهای مختلف از نوع سایش چسبان است.

#### ۵- نمادها

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| فاصله طی شده (m)     | Distance    |
| تنش مهندسی (MPa)     | Eng. Stress |
| کرنش مهندسی (%)      | Eng. Strain |
| وزن از دست رفته (mg) | Weight Loss |

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر دمای پیرسازی بر نوع شکست و مکانیسم سایش در فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد پرداخته شد. برای این منظور ابتدا پنج بلوک از فولاد هادفیلد بوسیله‌ی کوره القایی ریخته‌گری شدند. سپس هر پنج بلوک تحت عملیات حرارتی آستنیت در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و بلافاصله در حمام آب خالص سریع سرد شدند. سپس یک بلوک در شرایط آستنیت شده باقی مانده و چهار بلوک دیگر تحت عملیات پیرسازی در دمای  $450$ ،  $500$ ،  $550$  و  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت قرار گرفتند. در مرحله‌ی بعد، آزمایش‌های کشش تک‌محوره، سختی‌سنجی به روش ویکرز، سایش به روش پین روی دیسک، بررسی‌های میکروسکوپی و آنالیز XRD بر روی هر پنج نمونه انجام شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که:

- ۱- مشاهدات میکروسکوپ نوری نشان داد که افزایش دمای پیرسازی در فرآیند عملیات حرارتی فولاد هادفیلد منجر به کاهش اندازه دانه‌های آستنیت و افزایش میزان رسوبات کاربیدی می‌شود. همچنین با انتخاب هر دمای پیرسازی، فاز غالب موجود در ریزساختار آستنیت می‌باشد.
- ۲- نتایج آزمایش‌های کشش و سختی‌سنجی دلالت بر افزایش استحکام، سختی و همچنین کاهش کرنش شکست فولاد هادفیلد در اثر افزایش دمای پیرسازی فولاد هادفیلد داشتند. چون افزایش دمای پیرسازی منجر به افزایش میزان کاربیدها و متعاقباً ریز شدن دانه‌های آستنیت در ریزساختار شده بود.

[18] Annual book of ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese, Engineered Casting Solutions Since, Vol. 1, pp. 1-3, 2012.

[19] Annual book of ASTM E92-82, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, ASTM International, pp. 1-9, 2003.

[20] Annual book of ASTM E8 / E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, Vol. 03.01, 2015.

[21] Lee Y.K. and Choi C.S., Driving force for  $\gamma \rightarrow \epsilon$  martensitic transformation and stacking fault energy of  $\gamma$  in Fe-Mn binary system, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 31, No. 2, pp. 355-360, 2000.

[22] Hui W., Zhang Y., Shao C., Chen S., Zhao X., Dong H., Effect of Cooling Rate and Vanadium Content on the Microstructure and Hardness of Medium Carbon Forging Steel, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 32, No. 6, pp. 545-551, 2016.

[23] Galindo-Nava, E. I., Rivera-Díaz-del-Castillo P. E. J., Understanding the factors controlling the hardness in martensitic steels, Scripta Materialia, Vol. 110, pp. 96-100, 2016.

[24] Yin H., He Y., Moumni Z., Sun Q., Effects of grain size on tensile fatigue life of nanostructured NiTi shape memory alloy, Int. J. Fatigue, Vol. 88, pp. 166-177, 2016.

[25] Cai M. H., Zhu W. J., Stanford N., Pan L. B., Chao Q., Hodgson P. D., Dependence of deformation behavior on grain size and strain rate in an ultrahigh strength-ductile Mn-based TRIP alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 653, pp. 35-42, 2016.

[۲۶] هرتزبرگ ر. د.، اکرامی ع.ا. (مترجم)، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۲.

[۲۷] عباسی م. و همکارانش، ارزیابی مکانیزم شکست در فولاد هادفیلد، مجموعه مقالات ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و انجمن علمی ریخته گری ایران، تهران، ایران، ص ۹-۱، ۱۳۹۱.

شدت پراش (CPS) Intensity  
زاویه پراش (°) 20

## ۶-مراجع

[1] Barannikova S. A., Li Y., Malinovsky A., Pestsov D., Study of Localized Plastic Deformation of Hadfield Steel Single Crystals Using Speckle Photography Technique, Key Engineering Materials, Vol. 683, pp. 84-89, 2016.

[2] Limooei M.B. and Hosseini SH., Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels, Proc. Conf. of Metal 2012, Brono, Czech Republic, pp. 1-6, 2012.

[3] Najafabadi V.N., Amini K. and Alamdarlo M.B., "Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel, Metall. Res. Technol., Vol. 111, pp. 375 - 382, 2014.

[4] Magdaluyo E.R. and et al., "Gouging Abrasion Resistance of Austenitic Manganese Steel with Varying Titanium", Proc. of the World Congress on Engineering 2015, London, English, pp. 1-4, 2015.

[۵] نجف آبادی و.، مناجاتی زاده ح. و امینی ک.، بررسی تأثیر تیتانیوم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، شماره اول، صفحات ۵۴ - ۴۵، ۱۳۹۲.

[6] Srivastava A.K. and Das K., In-situ Synthesis and Characterization of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix Composite, Iron and Steel Institute of Japan Int., Vol.49, No.9, pp.1372-1377, 2009.

[7] Srivastava A.K. and et al., Corrosion Behaviour of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix In-Situ Composites, O. J. Metal, Vol. 5, No. 2, pp. 11-17, 2015.

[۸] خیاط م.، خیراندیش ش. و عباسی م.، تأثیر آلومینیم بر ریزساختار فولاد آستنیتی منگنزی هادفیلد در شرایط مختلف عملیات حرارتی، مجموعه مقالات دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته گری ایران، سمنان، ایران، ص ۵-۱، ۱۳۹۲.

[9] Tian X. and Zhang Y., Mechanism on the Effect of Al upon the  $\gamma \rightarrow \epsilon$  Martensite Transformation in the Fe-Mn Alloys, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 12, No. 5, pp. 369-372, 1996.

[10] Hosseini SH. And et al., Optimization of heat treatment due to austenising temperature, time and quenching solution in Hadfield steels, World Academy Sci. Eng. Technol., Vol.7, No. 7, pp. 1940-1943, 2013.

[11] Hosseini SH. and Limooei M.B., Optimization of heat treatment to obtain desired mechanical properties of high carbon Hadfield steels, World Appl. Sci. J., Vol. 15, No. 10, pp. 1421-1424, 2011.

[12] Moghaddam E.G., Varahram N. and Davami P., On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 532, No. 35, pp. 260-266, 2011.

[13] Agunsoye J.O., Isaac T.S. and Abiona A.A., On the Comparison of Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of High Chromium White Iron with the Hadfield Austenitic Manganese Steel, J. Miner. Mater. Charact. Eng., Vol. 1, No. 1, pp. 24-28, 2013.

[14] Lindroos M. and et al., The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions, Tribol. Lett., Vol. 57, No. 24, pp. 1-11, 2015.

[15] El-Mahallawi I., Abdel-karim A. and Naguib A., Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 17, No. 11, pp. 1385-1390, 2001.

[16] Abbasi M., Kheirandish SH., Kharrazi Y., Hejazi J., The fracture and plastic deformation of aluminum alloyed Hadfield steels, Mater. Eng. A, Vol. 513-514, pp. 72-76, 2009.

[17] Abbasi M., Kheirandish SH., Kharrazi Y., Hejazi J., On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels, Wear, Vol. 268, pp. 202-207, 2010.