

# اثر عملیات فوق پیری بر ریزساختار و خواص کششی فولادهای دوفازی نورد سرد شده نایوبیم دار

اشکان نوری<sup>۱\*</sup>، جمال الدین فرشته خصلت<sup>۲</sup>، قاسم عیسی آبادی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک (a-nouri@araku.ac.ir)

۲- کارشناس ارشد مهندسی مواد، شرکت مالیبل سایپا (jamaleddin1976@yahoo.com)

۳- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک (g-eisaabadi@araku.ac.ir)

## Effect of Over Aging Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of Cold-Rolled Dual-Phase Nb Steel

**A. Nouri<sup>1</sup>, J. Fereshtekheslat<sup>2</sup>, Gh. Eisaabadi<sup>3</sup>**

1-Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, E-Mail: a-nouri@araku.ac.ir

2-Master of Science in materials science and Engineering; Malleable Saipa Co., E-Mail: Jamaleddin1976@yahoo.com

3- Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, E-Mail: g-eisaabadi@araku.ac.ir

### چکیده

در این مقاله اثر عملیات فوق پیری و نایوبیم بر ریزساختار و خواص کششی فولاد نورد سرد شده دوفازی مطالعه شد. از دو فولاد کم کربن مختلف یکی حاوی نایوبیم و دیگری فاقد آن استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای میان بحرانی  $770^{\circ}\text{C}$  آویل شدند و سپس در حمام نمک در پنج دمای مختلف به مدت ۱۲ دقیقه فوق پیر شده و در انتها به آرامی تا دمای اتاق در هوا سرد شدند. ریزساختار نمونه‌ها از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و خواص کششی آنها به وسیله آزمون کشش تک محوری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که دمای فوق پیری تأثیری قابل توجه بر ریزساختار و خواص کششی هر دو فولاد دارد. این اثر همچنین در دو رژیم دمایی بالا و پایین متفاوت است. در رژیم دمایی پایین، افزایش دمای فوق پیری، استحکام تسلیم و کششی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد در حالی که ازدیاد طول نسبی را با نرخ زیادی افزایش می‌دهد. در رژیم دمایی بالا افزایش دما تأثیر قابل توجهی بر ازدیاد طول نسبی ندارد؛ در حالی که استحکام تسلیم را افزایش و استحکام کششی را کاهش می‌دهد. بررسی فولاد دوفازی نایوبیم‌دار نشان داد که افزودن نایوبیم به فولاد به طور کلی باعث افزایش قابل ملاحظه در استحکام شده و پایداری استحکام در دمای بالا را افزایش می‌دهد.

**واژه های کلیدی:** فولاد دوفازی نایوبیم دار، فوق پیری، ریزساختار، خواص کششی

### Abstract

In this paper, effects of over aging treatment and Nb addition on the microstructure and tensile properties of cold-rolled dual-phase steel were studied. Two different steel containing Nb and free Nb were considered. Samples were intercritical annealed at  $770^{\circ}\text{C}$  for 5 minute and then were over aged in the salt bath with five different temperatures for 12 minute and finally were slow cooled in the air to the room temperature. Samples microstructures were evaluated by scanning electron microscopy. Uniaxial tension test was used for study of tensile properties. The results implied that the over aging temperature affects microstructure and tensile properties of both steels significantly. This effect is also different in high and low temperature regime. In the low temperature regime; increasing of the over aging temperature, decreases yield and tensile strength significantly while elongation increases by a sharp rate. In high temperature regime; increasing temperature has not noticeably effect on the elongation. However, yield strength increased and tensile strength decreased. The consideration of dual-phase Nb steel showed that Nb addition increases strength significantly. Also, it was caused increasing in the strength stability in high temperature.

**Keywords:** Dual phase Nb steel, Over aging, Microstructure, Tensile properties

## مقدمه

فولادهای دوفازی دارای یک ساختار کامپوزیتی متشکل از فریت و مارتنزیت هستند. از جمله ویژگی‌های عمومی آنها می‌توان به استحکام تسلیم پایین، ازدیاد طول خوب، شکل‌پذیری مناسب و استحکام کششی بالا اشاره کرد [۱-۳]. از این رو این فولادها گزینه مناسبی برای کار در صنعت حمل و نقل محسوب می‌شوند. زیرا ویژگی‌های فوق منجر به استفاده از ورق‌های نازک‌تر، کاهش وزن و لذا کاهش در مصرف سوخت می‌گردند. از نقطه نظر صنعتی فولادهای دوفازی نورد سرد شده عموماً از طریق آنیل پیوسته و سپس کوئنچ در آب تولید می‌شوند [۴-۶]. برای ایجاد ساختار دو فازی می‌توان فولاد را مستقیماً و به صورت سنتی از منطقه دوفازی تا دمای اتاق سرد کرد تا فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده و فریت در مجاور آن باقی بماند و فولاد دوفازی شود. همچنین می‌توان فولاد را پس از آنیل میان بحرانی تا دمای مشخصی در پایین دمای آغاز تشکیل مارتنزیت ( $M_s$ ) سرد کرده و مدتی به صورت ایزوترم در این دما نگاه داشت تا به اصطلاح فولاد فوق پیر شده و سپس آن را تا دمای اتاق سرد نمود [۷]. انتظار می‌رود این عملیات بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد دوفازی موثر باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انجام عملیات فوق پیری و پیرسازی صورت گرفته در دمای اتاق بر روی این فولادها بر حفظ پایداری و ویژگی‌های مکانیکی آنها سودمند است [۷-۱۰]. این عملیات منجر به بهبود انعطاف‌پذیری و افزایش پایداری حرارتی فولاد دوفازی از طریق پایداری فاز سخت مارتنزیت موجود در آن می‌شود.

در کار حاضر، خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختاری یک فولاد دو فازی نایوبیم‌دار بعد از فوق پیری در دماهای مختلف مطالعه و با فولاد دو فازی فاقد نایوبیم مقایسه گردید. به این ترتیب میزان تاثیر عنصر آلیاژی نایوبیم و دمای فرآیند بر رفتار فوق پیری فولادهای دوفازی تبیین گردید.

## مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق‌های نورد سرد شده با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر استفاده شد که ترکیب شیمیایی آنها در جدول ۱ ارائه

شده است. هر دو فولاد از نوع فولادهای کم کربن منگن‌دار هستند. فولاد ۱ فاقد نایوبیم و فولاد ۲ حاوی نایوبیم است. ترکیب فولادها به گونه‌ای فراهم شد که تفاوت اصلی در ترکیب شیمیایی آنها فقط ناشی از وجود یا عدم وجود نایوبیم باشد تا بتوان تفاوت‌های موجود در دو فولاد را به عنصر آلیاژی نایوبیم منتسب نمود. از این رو سایر عناصر موجود در دو فولاد تقریباً مشابه می‌باشند.

برای ایجاد ساختار دو فازی، نمونه‌های متالوگرافی و کشش تهیه شده از فولادها، به مدت ۵ دقیقه در دمای بین بحرانی  $770^{\circ}\text{C}$  آنیل شدند. یک نمونه از هر فولاد به صورت سنتی و مرسوم مستقیماً در آب سرد کوئنچ شد تا ساختار دو فازی فریتی-مارتنزیتی در آن ایجاد شود. در حالی که سایر نمونه‌ها از دمای  $770^{\circ}\text{C}$  به حمام نمک با دماهای پایین‌تر مختلف انتقال یافته و به صورت ایزوترم نگاه‌داری شده تا فوق پیر شوند. نمونه‌ها سپس در هوا تا دمای اتاق سرد شدند. دمای فوق پیری فولادها با توجه به دمای ( $M_s$ ) آنها انتخاب گردید. بر طبق معادله تجربی Andrews [۱۱] دمای ( $M_s$ ) هر دو فولاد با توجه به ترکیب شیمیایی آنها بیش از  $400^{\circ}\text{C}$  می‌باشد؛ لذا با توجه به این نکته پنج دمای فوق پیری انتخاب گردید. این دماها به ترتیب از کم به زیاد ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و  $400^{\circ}\text{C}$  می‌باشند. زمان فرآیند فوق پیری کلیه نمونه‌ها که در حمام نمک دمای متوسط صورت گرفت یکسان و برابر ۱۲ دقیقه بود. لذا در هر دو فولاد ۱ و ۲، پنج نمونه فوق پیر شده همراه با نمونه‌ای که بدون فوق پیری مستقیماً در آب سرد کوئنچ شده بود که به آن در این مقاله نمونه فوق پیر شده در دمای  $0^{\circ}\text{C}$  اطلاق می‌شود؛ جمعاً ۶ نمونه، مورد بررسی‌های ریزساختاری و کششی قرار گرفته و نتایج آنها با هم مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل واقع شدند تا فولاد و دمای بهینه فوق پیری تعیین گردد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی).

	C	Mn	Si	P	S	Nb
فولاد ۱	۰/۱۴	۱/۲۴	۰/۲۱	۰/۰۰۶	۰/۰۱۱	---
فولاد ۲	۰/۱۴	۱/۳۰	۰/۲۲	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۰/۰۷

برای بررسی ریزساختار، نمونه‌ها پس از سنگ‌زنی و پولیش مکانیکی در محلول نایتال ۲٪ اچ شدند. ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. برای انجام آزمون کشش تک محوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM-E8 [۱۲] با طول سنج ۵۰mm در جهت نورد تهیه شده و با سرعت ۴mm/min در دمای اتاق کشیده شدند. در هر یک از شرایط سه نمونه مورد آزمون واقع شد. استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول یکنواخت نمونه‌ها تعیین شد. همچنین به منظور تحلیل بهتر، نسبت استحکام تسلیم به کششی نمونه‌ها و نیز حاصل ضرب استحکام کششی در ازدیاد طول یکنواخت آنها محاسبه گردید.

## نتایج و بحث

### ۱- بررسی خواص مکانیکی

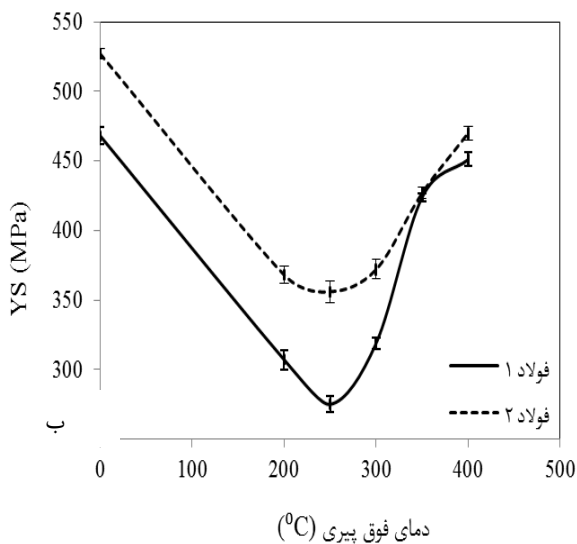
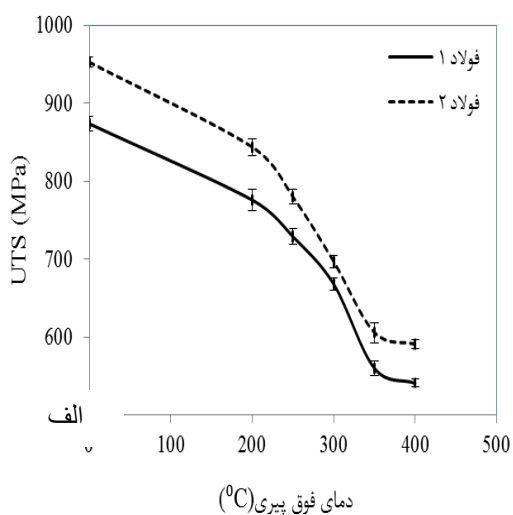
شکل ۱ تغییر در استحکام تسلیم و کششی با دمای فوق پیری را برای دو فولاد پس از فوق پیری به مدت ۱۲ دقیقه نشان می‌دهد (درجه سانتی‌گراد به عنوان نمونه پس از کوئنچ در آب است). به طور کلی دیده می‌شود که استحکام فولاد نایوبیم‌دار (فولاد ۲) در مقایسه با فولاد بدون نایوبیم (فولاد ۱) در شرایط عملیات حرارتی مشابه به مراتب بیشتر است. این در حالی است که روند تغییر در استحکام با دمای فوق پیری در هر دو فولاد تقریباً مشابه است. در هر دو فولاد بیشترین استحکام تسلیم و کششی مربوط به نمونه کوئنچ شده است. با افزایش دمای فوق پیری، استحکام کششی به طور کلی کاهش می‌یابد در حالی که استحکام تسلیم در هر دو فولاد با افزایش دمای فوق پیری تا دمای ۲۵۰°C کاهش و در ادامه افزایش می‌یابد که نشان از وجود مکانیزم موثر و متفاوتی در استحکام تسلیم و کششی دارد. شکل ۲ تاثیر دمای فوق پیری بر کرنش یکنواخت پلاستیک نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کرنش مومسان در نمونه‌های فوق پیر شده به صورت قابل توجهی نسبت به نمونه کوئنچ شده بیشتر است. در واقع کمترین انعطاف‌پذیری در هر دو فولاد به نمونه کوئنچ شده تعلق دارد. در فولاد ۱ نمونه فوق پیر شده در دمای پایین ۲۰۰°C کرنش پلاستیکش ۱۳۴٪ بیشتر از نمونه کوئنچ شده است در حالی که این عدد در فولاد ۲ تنها ۵۲٪ است. این امر حکایت از این دارد

که انجام فوق پیری در دماهای پایین در فولاد بدون نایوبیم تاثیر کمتری بر انعطاف‌پذیری نسبت به فولاد حاوی نایوبیم دارد. نکته مهم دیگر که از ملاحظه شکل ۲ می‌توان دریافت این است که در فولاد ۱ دمای فوق پیری تاثیر قابل توجهی بر کرنش پلاستیک ندارد در حالی که در فولاد ۲ با فوق پیری در دمای ۳۰۰°C و بالاتر از آن جهش قابل توجهی در کرنش پلاستیک نسبت به دماهای کمتر از آن دیده می‌شود. همچنین دیده می‌شود که انعطاف‌پذیری با افزایش دمای فوق پیری از ۳۵۰°C به ۴۰۰°C برخلاف دماهای قبل آن که با افزایش همراه بود با کاهش مواجه می‌شود. به هر حال می‌توان دریافت که نمونه‌های بدون نایوبیم علیرغم داشتن استحکام تسلیم و کششی کمتر نسبت به نمونه نایوبیم‌دار از کرنش پلاستیک بیشتری برخوردارند که البته این بیشتر بودن در فولاد ۱ به ویژه در دماهای فوق پیری ۳۰۰ و ۳۵۰°C نسبت به فولاد ۲ خیلی زیاد نیست. شکل ۳ نسبت تسلیم (استحکام تسلیم به استحکام کششی) را در دو فولاد در شرایط مختلف عملیات حرارتی نشان می‌دهد. از آنجایی که بر اساس شکل ۱ استحکام کششی همواره با افزایش دمای فوق پیری کاهش می‌یابد ولی این کاهش در استحکام تسلیم تا دمای ۲۵۰°C صورت می‌گیرد و در بالاتر از آن با افزایش استحکام تسلیم دو فولاد مواجهیم می‌توان دریافت که در دماهای بالای فوق پیری، نسبت تسلیم زیادی ایجاد شود که شکل ۳ نیز این امر را نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که نسبت تسلیم در هر دو فولاد به یکباره با افزایش دمای فوق پیری از ۳۰۰ به ۳۵۰°C نسبت تسلیم از حدود ۰/۵ به حدود ۰/۷۵ می‌رسد که افزایشی حدوداً ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد. در ادامه نیز با افزایش دمای فوق پیری از ۳۵۰ به ۴۰۰°C این فاکتور قدری بیشتر افزایش می‌دهد. از آنجایی که از جمله ویژگی‌های شناخته شده و مهم فولادهای دوفازی نسبت تسلیم پایین است؛ می‌توان گفت که در دماهای بالای فوق پیری، رفتار فولادها از رفتار عمومی فولادهای دوفازی قدری متفاوت می‌شود. شکل ۳ همچنین نشان می‌دهد که نسبت تسلیم در هر دو فولاد تقریباً مشابه است. به طوری که در برخی شرایط عملیات حرارتی این نسبت اندکی در فولاد ۱ بیشتر و در برخی شرایط اندکی در فولاد ۲ بیشتر است. در هر دو فولاد نمونه‌های کوئنچ شده نسبت تسلیم بالاتری در مقایسه با نمونه-

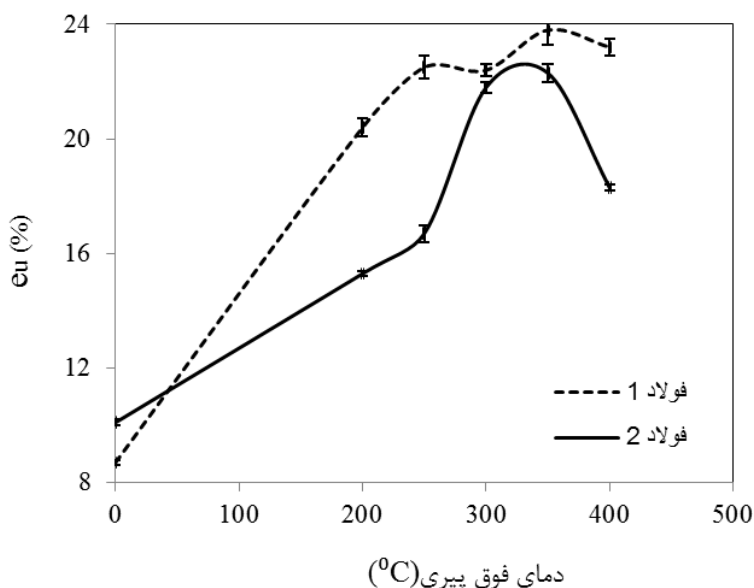
پلاستیک آنها محاسبه و در شکل ۴ ترسیم گردید. دیده می شود که این فاکتور در نمونه های کوئنچ شده در هر دو فولاد به مراتب کمتر از نمونه های فوق پیر شده است. در فولاد ۱ بیشترین مقدار این فاکتور مربوط به نمونه فوق پیر شده در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  است در حالی که مقدار بیشینه این فاکتور در فولاد ۲ مربوط به دمای  $300^{\circ}\text{C}$  است. در بین نمونه های فوق پیر شده (به استثنای نمونه ای که مستقیماً کوئنچ شده است)، فاکتور حاصل ضرب

های فوق پیر شده در دماهای  $300^{\circ}\text{C}$  و کمتر از آن دارند در حالی که این نسبت در نمونه های فوق پیر شده در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  جهش قابل ملاحظه ای کرده و نسبت به نمونه های کوئنچ شده به صورت محسوسی بیشتر است.

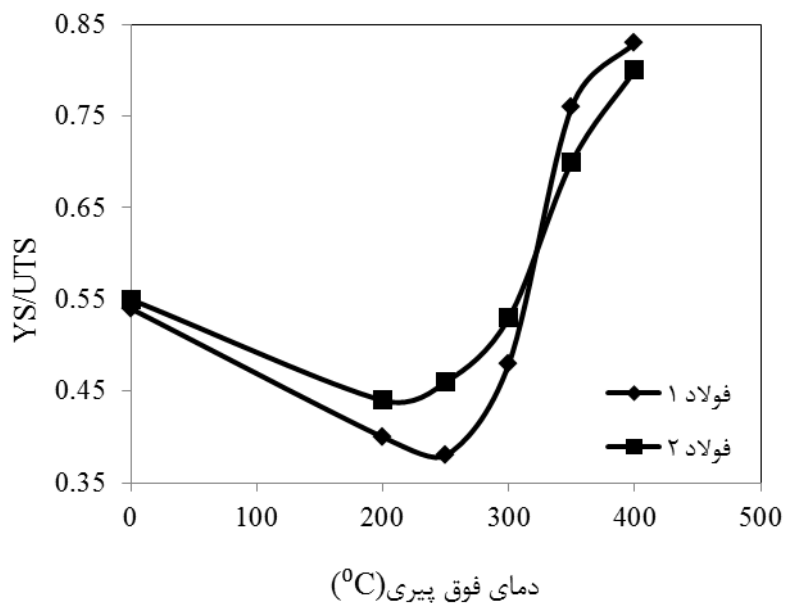
برای تحلیل بهتر پیرامون رفتار مکانیکی نمونه ها و تاثیر شرایط عملیاتی بر مجموع خواص استحکام و انعطافی آنها و نیز مقایسه بهتر، حاصل ضرب استحکام کششی در کرنش



شکل ۱- تغییر استحکام فولادهای دو فازی با دمای فوق پیری. الف: استحکام کششی، ب: استحکام تسلیم

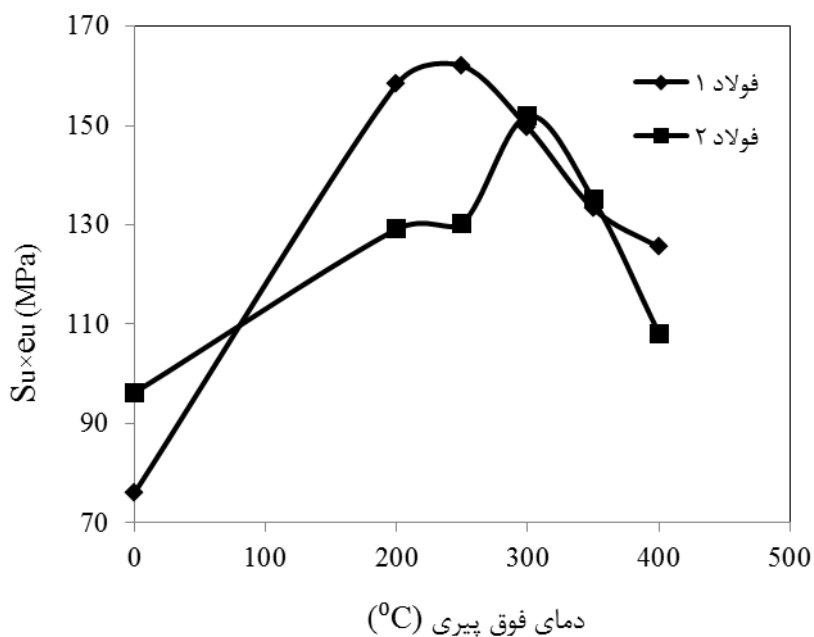


شکل ۲- تغییر کرنش یکنواخت پلاستیک فولادهای دو فازی با دمای فوق پیری.



شکل ۳- تغییر نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی (نسبت تسلیم) فولادهای دوفازی با دمای فوق پیری.

استحکام کششی در کرنش پلاستیک در هر دو فولاد به نمونه فوق پیر شده در دمای بالای  $400^{\circ}\text{C}$  تعلق دارد. می توان گفت فرآیند فوق پیری موجب تجزیه مارتنزیت، رسوب گذاری کاربید و کاهش اعوجاج در شبکه مارتنزیت شده بنابراین تنش باقی مانده و پس ماند ناشی از کوئنچ کاهش می یابد [۱۳]. هرچه دمای فرآیند بیشتر باشد اتفاقات فوق با شدت بالاتری صورت می گیرد [۱۳].



شکل ۴- تغییر حاصل ضرب استحکام کششی در کرنش یکنواخت پلاستیک فولادهای دوفازی با دمای فوق پیر

## ۲- بررسی ریزساختار

شکل‌های ۵ و ۶ تصاویر ریزساختار SEM از نمونه‌های مربوط به هر دو فولاد را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که فولاد نایوبیم‌دار در مقایسه با فولاد فاقد نایوبیم، مارتنزیت بیشتری دارد در حالی که در هر دو فولاد تغییر مشابهی در میزان مارتنزیت با دمای فرآیند فوق پیری وجود دارد. با مشاهده تصاویر این‌گونه به نظر می‌رسد که با افزایش دمای فوق پیری به بیش از  $300^{\circ}\text{C}$ ، مارتنزیت به تدریج شروع به تجزیه می‌کند و ایجاد مرزهای نامشخص و همچنین رسوب گذاری پیوسته و رشد ذرات کاربیدی در جزایر مارتنزیتی می‌شود [۱۴] (اشکال ۵e-f و 6e-f). در حالی که در نمونه‌های کوئنچ شده (اشکال 5a و 6a) جزایر مارتنزیتی موجود، مرزهای مشخص با حلقه‌هایی روشن سفید را نشان می‌دهند و تغییر ظاهری قابل توجهی نیز پس از فوق پیری در دماهای پایین ( $200-300^{\circ}\text{C}$ ) را از خود نشان نمی‌دهند (اشکال 5b-c و 6b-c).

با توجه به نتایج مکانیکی موجود در شکل‌های ۱ تا ۴ این‌گونه به نظر می‌رسد از آنجایی که دمای عملیات فوق پیری تاثیری قابل ملاحظه بر ریزساختار دارد؛ از این رو، انتظار تغییر در خواص مکانیکی منطقی می‌باشد. در حقیقت بین ریزساختار با خواص کششی فولادهای دوفازی فوق پیر شده ارتباط قابل توجهی وجود دارد. وقتی فوق پیری در دمای پایین انجام می‌شود، تغییر در دو فاز فریت و مارتنزیت کمتر است اما به نظر می‌رسد این عمل باعث آزاد شدن و در نتیجه کم شدن ناهمگنی دو فاز بعد از کوئنچ گردد. این امر منجر به توزیع مجدد کربن مارتنزیت شده لذا انتظار می‌رود کیفیت مارتنزیت موجود بهبود یابد [۱۵ و ۱۶]. بنابراین با زیاد شدن دمای فوق پیری در محدوده ۲۰۰ تا  $300^{\circ}\text{C}$  هم استحکام تسلیم و هم استحکام کششی اندکی کاهش می‌یابند در صورتی که انعطاف‌پذیری به شدت افزایش می‌یابد. از سوی دیگر هنگامی که فوق پیری در رژیم دمایی بالا انجام می‌شود، با افزایش دمای فوق پیری، مارتنزیت شروع به نرم شدن و تجزیه شدن کرده که این عمل موجب می‌شود ناهمگنی‌های هندسی ناشی از اعوجاج به صورت دو سویه در عرض فصل مشترک فریت / مارتنزیت موازنه شوند و لذا چگالی آنها کاهش یابد [۱۷]. ضمن

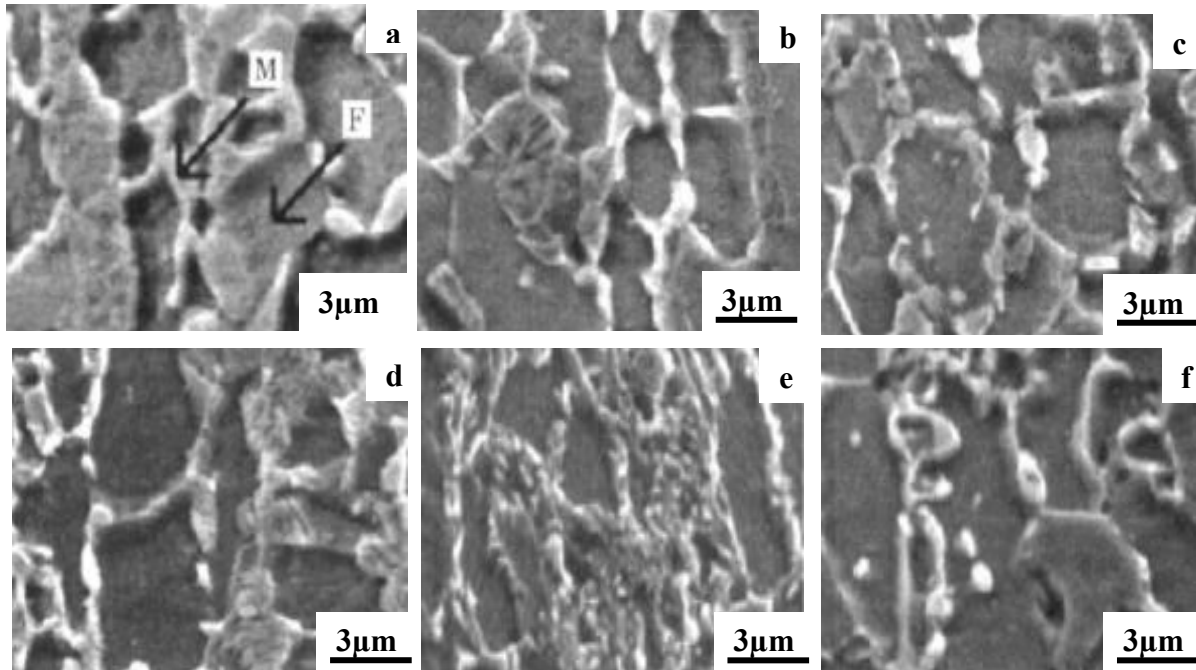
آنکه رسوب‌گذاری و رشد ذرات کاربیدی در مارتنزیت موجب دشوارتر شدن حرکت نابجایی‌ها می‌گردد [۱۵، ۱۸ و ۱۹]. بنابراین استحکام تسلیم هر دو فولاد به صورت محسوسی افزایش می‌یابد حال آنکه استحکام کششی آنها با افزایش دمای فوق پیری از ۳۰۰ تا  $400^{\circ}\text{C}$  به صورت قابل توجهی افت می‌کند. همچنین کرنش پلاستیک تغییر کوچکی یافته در نتیجه حاصل‌ضرب استحکام کششی در کرنش پلاستیک آنها کاهش عمده‌ای می‌یابد.

با مقایسه دقیق‌تر ریزساختار و خواص دو فولاد نتیجه می‌شود که چه با اعمال فوق پیری و چه بدون آن، فولاد نایوبیم‌دار استحکام بیشتر و ازدیاد طول نسبی کمتری از فولاد فاقد نایوبیم از خود نشان می‌دهد. این‌گونه به نظر می‌رسد که نایوبیم سختی-پذیری و استحکام فولاد دو فازی را به صورت موثری در این تحقیق و مطالعه بالا می‌برد. از آنجایی که برای ایجاد ساختار دوفازی، فولادها در ناحیه بین بحرانی، گرم می‌شوند لذا انتظار می‌رود با گرمایش فولاد در این ناحیه، کاربیدهای نایوبیم به صورت جزئی حل شوند. وجود منگنز موجود در فولاد می‌تواند این فرآیند را سرعت بخشد که این امر موجب افزایش سختی-پذیری فولاد دوفازی می‌گردد [۲۰-۲۲]. در نتیجه در خلال فرآیند کوئنچ، مقداری کاربید نایوبیم می‌تواند در فریت رسوب کند که این خود موجب افزایش استحکام فولادهای دوفازی می‌شود [۲۳].

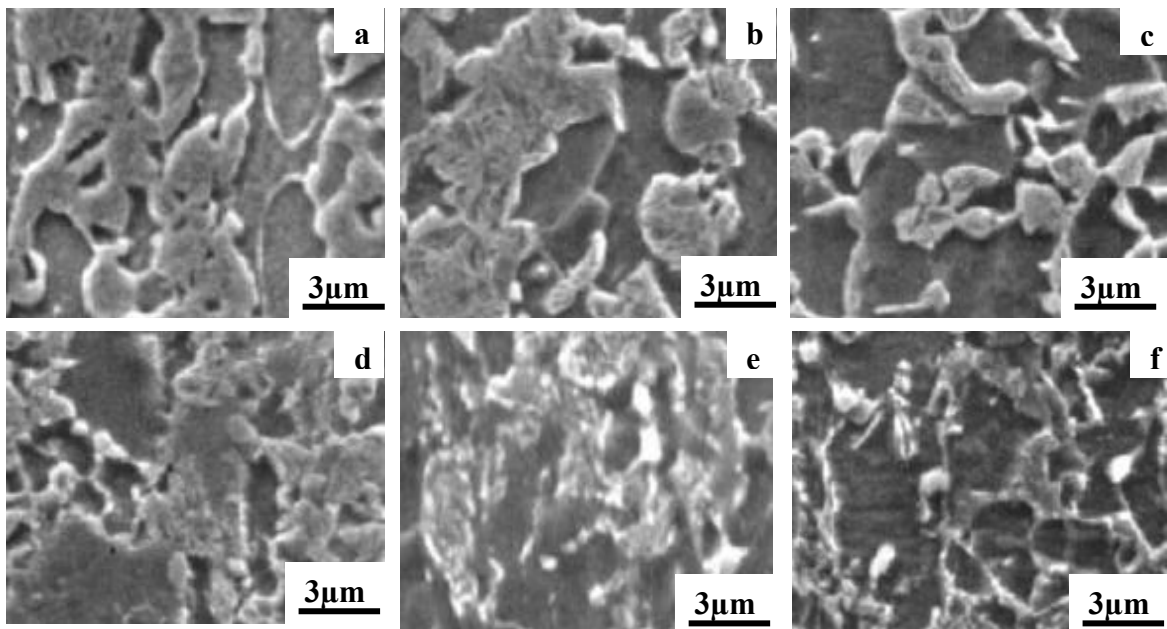
شکل ۷ نمودار میکروسختی فولادهای دوفازی را با دمای فوق پیری نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل و حاصل‌ضرب استحکام کششی در کرنش پلاستیک (شکل ۴) می‌توان گفت که پس از فوق پیری در دمای بالا، سختی فاز فریت در فولاد نایوبیم‌دار کمی کاهش یافته و حاصل‌ضرب استحکام کششی در کرنش پلاستیک در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  به حداکثر خود می‌رسد که به طور کلی از فولاد ۱ بیشتر است. این دو پدیده می‌توانند گویای این امر باشند که افزودن نایوبیم می‌تواند مقاومت در برابر نرم‌شدگی ناشی از پیرسازی فولادهای دو فازی را بهبود بخشد. در تبیین این اتفاق می‌توان گفت؛ نایوبیم از آنجایی که یک عنصر کاربیدساز قوی محسوب می‌شود، می‌تواند انرژی اکتیواسیون نفوذ کربن در مارتنزیت را افزایش دهد و از نفوذ کربن در مارتنزیت جلوگیری کند؛ لذا تجزیه مارتنزیت را به تعویق بیندازد [۲۴]. در نتیجه از رشد کاربید در مارتنزیت جلوگیری می‌نماید. از این رو، نایوبیم



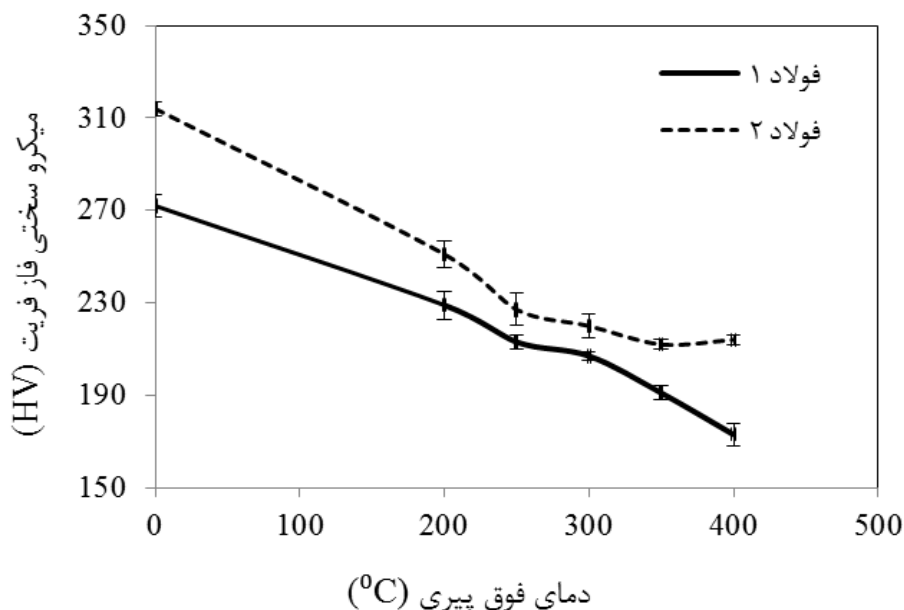
می‌تواند پایداری حرارتی فولادهای دو فازی را بهبود بخشد [۲۵]. برای فولادهای دو فازی کم کربن سودمند است. بنابراین می‌توان به طور کلی نتیجه گرفت که نایوبیم از این حیث



شکل ۵- ریزساختار فولاد ۱ پس از فوق پیری در دماهای مختلف. (a)  $0^{\circ}\text{C}$  (کوئنچ شده)، (b)  $200^{\circ}\text{C}$ ، (c)  $250^{\circ}\text{C}$ ، (d)  $300^{\circ}\text{C}$ ، (e)  $350^{\circ}\text{C}$ ، (f)  $400^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۶- ریزساختار فولاد ۲ پس از فوق پیری در دماهای مختلف. (a)  $0^{\circ}\text{C}$  (کوئنچ شده)، (b)  $200^{\circ}\text{C}$ ، (c)  $250^{\circ}\text{C}$ ، (d)  $300^{\circ}\text{C}$ ، (e)  $350^{\circ}\text{C}$ ، (f)  $400^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۷- تغییر میکروسختی فاز فریت فولادهای دوفازی با دمای فوق پیری

### نتیجه گیری

در یک استحکام بالاتر، میکروسختی و حاصل ضرب استحکام کششی در کرنش پلاستیک بالاتری را در دمای بالای فوق پیری نسبت به فولاد فاقد نایوبیم از خود نشان داد.

۳- نتایج نشان داد که بهینه دمای فرآیند فوق پیری برای فولاد بدون نایوبیم حدود  $250^{\circ}\text{C}$  است، در حالی که این عدد برای فولاد نایوبیم دار در حدود  $300^{\circ}\text{C}$  است و بهترین خواص مکانیکی در این دماها در دو فولاد می تواند بدست آید.

### منابع و مراجع

- [1] G. R. Speich, R. L. Miller, "Mechanical Properties of Ferrite-Martensite Steels", Structure and Properties of Dual-Phase Steels, In: R. A. Kot, J. W. Morris (ed.), New York, TMS-AIME, 1979, pp. 145-182.
- [2] R. G. Davies, C. L. Magee, "Physical Metallurgy of Automotive High Strength Steels", In Structure and Properties of Dual-Phase Steels, In: R. A. Kot, J. W. Morris (ed.), New York, TMS-AIME, 1979, pp. 1-19.
- [3] G. R. Speich, "Physical Metallurgy of Dual-Phase Steels", In Fundamentals of Dual Phase Steels, In: R. A. Kot, B. L. Bramfitt (ed.), TMS-AIME, 1981, pp. 3-45.
- [4] H. E. Ze-fu, X. Ajing, Q. Xiao-rong, "Microstructure Observation of Si-Mn Duplex Phase Steels", Steel Res. Int., 1, 1985, pp. 83-89.

۱- وقتی فرآیند فوق پیری در دماهای کم انجام می شود، هم استحکام تسلیم و هم استحکام کششی اندکی کاهش می یابند، در صورتی که کرنش پلاستیک و حاصل ضرب استحکام کششی در کرنش پلاستیک به صورت قابل توجهی با افزایش دمای فوق پیری افزایش می یابند. همچنین هنگامی که فوق پیری در دماهای بالا انجام می شود، با افزایش دمای فرآیند، استحکام تسلیم به صورت محسوس افزایش یافته و استحکام کششی کاهش می یابد در حالی که در این وضعیت، تغییرات انعطاف پذیری کوچک بوده و حاصل ضرب استحکام کششی در کرنش پلاستیک به صورت عمده ای کاهش می یابد.

۲- با افزودن نایوبیم در این تحقیق نتیجه گیری شد که نایوبیم، استحکام را به میزان قابل توجه افزایش داده و پایداری حرارتی را بهبود می بخشد. به طوری که استحکام کششی به ترتیب در دمای فوق پیری  $0^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  در فولاد نایوبیم دار حدود  $80$  و  $50\text{ MPa}$  بیشتر از فولاد فاقد نایوبیم و استحکام تسلیم در همین دو دمای فوق پیری به ترتیب حدود  $60$  و  $20\text{ MPa}$  در فولاد نایوبیم دار بیشتر است. فولاد نایوبیم دار



- [15] S. Kuang, Y. I. Kang, H. Yu, "Influence of Tempering on Microstructure and Mechanical Property of Dual Phase Steel of C-Si-Mn Alloy System", *J. Iron and Steel res.*, 43, 2008, pp. 77- 83.
- [۱۶] عبدالحمید آنازاده سید، شهرام خیراندیش، "اثر عملیات بازگشت دادن بر خواص مکانیکی فولادهای دوفازی"، یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، ۱۳۸۶.
- [17] M. Erdogan, "Effect of Austenite Dispersion on Phase Transformation in Dual Phase Steel", *Scr. Metall.*, 48, 2003, pp. 501-506.
- [18] M. S. Rashid, B. V. N. Rao, "Tempering Characteristics of a Vanadium Containing Dual-Phase Steel", *Metall. Trans.*, 13A, 1982, pp. 1679-1686.
- [19] D. K. Mondal, R. K. Ray, "Effect of Chemical Composition and Initial Heat Treatment on the Structure and Properties of a Few Dual-Phase Steels", *Steel. Res.*, 60, 1989, pp. 25-32.
- [20] B. Mintz, J. Kolahi-Aval, "Intercritical Annealing as a Means of Improving Impact Properties of Plate Steel", *Metall. Trans.*, 19A, 1988, pp. 1481-1490.
- [21] G. R. Speich, V. A. Demarset, R. L. Miller, "Formation of Austenite during Intercritical Annealing of Dual-Phase Steels", *Metall. Trans.*, 12A, 1981, pp. 1419-1428.
- [۲۲] حامد سلیمانی، عباس نجفی زاده، "بررسی اثر پارامترهای دما و زمان بر خواص مکانیکی یک فولاد نایوبیم دار دوفازی"، دومین کنفرانس بین المللی و هشتمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید"، ۱۳۸۶.
- [23] M. T. Ma, B. R. Wu, "Dual-Phase Steel", Beijing China Metallurgical Industry Press, 1988.
- [24] G. E. Totten, M. A. H. Howes, "Steel Heat Treatment Handbook", Publication Data, 1997.
- [25] V. Radmilovic, D. Dorbanjak, M. Jovanovic, "Serrated Yielding in Nb-V Dual Phase Steel", *Mater. Sci. & Tech.*, 5, 1989, pp. 908-912.
- [5] G. T. Eldis, "The Influence of Microstructure and Testing Procedure on the Measured Mechanical Properties of Heat Treated Dual-Phase steels", In *Structure and Properties of Dual-Phase Steels*, In: R. A. Kot, J. W. Morris (ed.), New York, TMS-AIME, 1979, pp. 202-220.
- [6] P. Messien, J. C. Hermau, T. Greday, "The Influence of Cooling Rates After Continious Annealing during the Production D. D. Q and D. P Steel Grades", *Metallurgy of Continious Annealed Sheet Steel*, In: B. L. Bramfitt, P. L. Manganon (ed.), New York, TMS-AIME, 1982, pp. 271-286.
- [7] R. A. Kot, B. L. Bramfitt, "Fundamentals of Dual-Phase Steels" Warrendale: Metallurgical Society of AIME. 1981, pp. 66-121.
- [8] J. Takasaki, T. Irie, T. Haga, "Production of Cold Rolled High Strength Steels With Excellent. Press Formability by Continuous Annealing", *Tetsu-toHagane*, 9, 1982, pp. 150 - 158.
- [9] G. Jiang, L. I. Junhua, H. U. Jun, "Tempered Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-High Strength ColdRolled Low-Carbon Si-Mn Dual Phase Steel", *Heat Treatment of Metals*, 32, 2007, pp. 13-18.
- [10] X. D. Zhu, U. Wang, "Effect of Over Ageing on the Mechanical Properties and microstructure of Cold Rolled Low Carbon Si-Mn Dual Phase Steel Sheets", *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 24, 2003, pp. 50-55.
- [11] K. W. Andrews, "Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures", *J. Iron and Steel Inst.*, 1965, pp. 721-727.
- [12] ASTM, E8, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, 1988.
- [13] X. D. Zhu, U. Wang, N. I. Yu, "Effect of Over Ageing and Temper Rolling on Mechanical Property and Bake Hardenability of Cold Rolled Dual Phase Steel Sheet", *J. Iron and Steel Res.*, 15, 2003, pp. 47-54.
- [14] D. K. Mondal, R. K. Ray, "Microstructural Changes and Kinetics of Recrystallisation in a Few Dual-Phase Steels", *Steel Res.*, 60, 1989, pp. 33- 40.