

## توسعه فولادهای نانو ساختار بینیتی به روش عملیات حرارتی دو مرحله‌ای

میلاد فوقانی<sup>۱</sup>، علیرضا کلاهی\*<sup>۱</sup>، مهدی علی‌زاده<sup>۱</sup>، یحیی پالیزدار<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، کرج، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۱۱/۱

**چکیده** امروزه فولادهای نانو ساختار بینیتی به دلیل خواص مکانیکی ویژه، از جمله استحکام، سختی بالا، چقرمگی قابل قبول و همچنین هزینه‌های تولید نسبی پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. مشکل اصلی برای صنعتی شدن این نوع فولادها مدت زمان طولانی استحاله هم‌دمای بینیتی است که به موجب آن، زمان و هزینه‌های تولید افزایش می‌یابد. در این پژوهش برای کاهش زمان تولید و تسریع استحاله هم‌دمای بینیتی از فولاد کربن متوسط به جای فولاد پرکربن، و برای جلوگیری از رشد صفحات ضخیم از عملیات آستمپرینگ دو مرحله‌ای استفاده شده است. برای انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها ابتدا در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه آستنیت‌دهی شده و سپس در کوره حمام نمک قرار داده شدند تا در بازه‌های زمانی ۱ تا ۱۲ ساعت در دمای بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در طی یک یا دو مرحله، استحاله هم‌دمای بینیتی انجام شود. نمونه‌ها تحت بررسی‌های ریزساختاری، آزمون کشش، سختی‌سنجی ویکرز و پراش پرتو ایکس قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش مقدار کربن و اعمال آستمپرینگ دو مرحله‌ای به سبب کاهش زمان استحاله و همچنین کاهش دمای استحاله در مرحله دوم، موجب می‌شود صفحات بینیتی هرچه ظریف‌تر شده و از تشکیل آستنیت‌های ناپایدار جلوگیری کند که این خود باعث بهبود خواص مکانیکی در این فولاد شد.

**کلمات کلیدی:** فولادهای کربن متوسط، بینیت نانو ساختار، آستمپرینگ دو مرحله‌ای، خواص مکانیکی.

## Development of Nanostructured Bainitic Steel by Utilizing the Two Steps Austempering Heat Treatment

Milad Foughani<sup>1</sup>, Alireza Kolahi\*<sup>1</sup>, Mehdi Alizadeh<sup>1</sup>, Yahya Palizdar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Materials and Energy Research Center (MERC), Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Karaj, Iran.

**Abstract** Special mechanical properties of nano structure bainitic steel such as high tensile strength, hardness, toughness and low manufacturing cost have attracted considerable attention in the past few years. However, the main problem for this type of steels to be industrialized, long austempering process period which increases production costs. In this research, in order to accelerate the bainitic transformation, carbon concentration was decreased and two steps austempering process was employed to prevent the bainite laths thickening. Specimens were austenitized at 1000 °C for 15 min and were kept in the salt bath between 1-12 hours at temperatures in the range of 250-300°C in one step or two step bainite transformation. Standard metallography, XRD and scanning electron microscopy techniques were utilized for the microstructural characterization and the tensile and hardness test were employed for mechanical properties evaluation. The obtained results show that two steps austempering process and lower carbon concentration lead to lower austempering period as well as formation of more stable retained austenite which results in higher mechanical properties.

**Keywords:** Medium Carbon Steels, Nanostructure Bainite, Two Steps Austempering, Mechanical Properties.

## ۱- مقدمه

فولادهای نانو ساختار بینیتی دارای خواص مکانیکی مناسب از جمله استحکام و سختی بالا و چقرمگی قابل قبول می‌باشند که از این رو جایگزین خوبی برای فولادهای مارایجینگ<sup>۱</sup> هستند. با این حال این نوع فولادها به دلیل عدم نیاز به عناصر آلیاژی گران قیمت و همچنین عدم نیاز به ذوب و ریخته‌گری در خلاء، نسبت به فولادهای مارایجینگ و سایر فولادهای آلیاژی هزینه‌ی تولید پایین‌تری دارند و از این رو مورد توجه بسیاری از محققان و صنعتگران قرار گرفته اند [۱و۲].

جهت دستیابی به این ساختارهای نانومتری بینیتی در فولادها نیاز است که این نمونه‌ها را پس از آستنیت‌کردن، در دمایی پایین‌تر از دمای شروع استحاله بینیتی و بالاتر از دمای شروع استحاله مارتنزیت در زمان‌های طولانی مدت (در برخی از تحقیقات تا ۷۲ ساعت) نگهداری کرد تا استحاله هم‌دمای بینیتی اتمام یابد. در نتیجه مشکل اصلی صنعتی شدن این نوع فولادها طولانی بودن مدت زمان عملیات حرارتی آستمپرینگ و تکمیل استحاله بینیتی می‌باشد [۳]. در تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان برای سرعت بخشیدن به استحاله بینیتی از افزودن عناصر آلیاژی استفاده شده است ولی افزودن این عناصر خود موجب افزایش هزینه‌های تولید می‌شود [۴]. افزایش دمای این استحاله‌های هم‌دما نیز به دلیل افزایش سرعت نفوذ کربن می‌تواند سرعت استحاله را افزایش دهد ولی با افزایش نفوذ، ضخامت صفحات فریت بینیتی افزایش یافته و خواص مکانیکی افت می‌کند و در نتیجه برای حصول خواص مکانیکی بهتر، استحاله‌ها در کمترین دمای ممکن انجام می‌گیرد [۵].

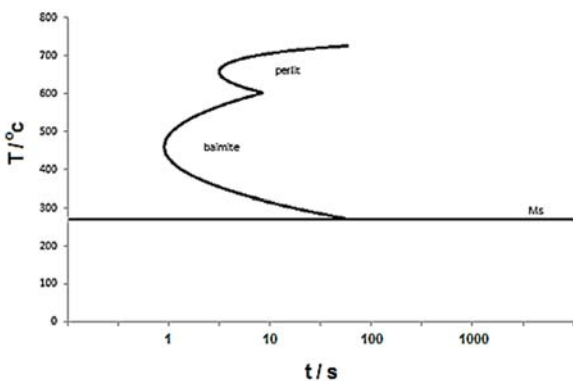
به‌طور کلی دو مورفولوژی از آستنیت در فولادهای بینیتی وجود دارد: اول آستنیت‌های ورقه‌ای غنی از کربن که در میان صفحات فریت بینیتی قرار گرفته‌اند و دوم آستنیت‌های اولیه‌ی بلوکه شده. از آنجایی که آستنیت در فولادهای کم کربن و کربن متوسط در دمای پایین پایداری نسبی کمی دارد، ممکن است در طول خنک‌شدن نهایی تا دمای محیط، به مارتنزیت تبدیل شود. این مارتنزیت و آستنیت‌های بلوکی اولیه

سخت و شکننده‌اند و در نهایت باعث کاهش چقرمگی در فولاد می‌شوند. این آستنیت‌های اولیه‌ی باقی‌مانده باعث ناپایداری ساختار می‌شوند و در نهایت در اثر اعمال بار به مارتنزیت تبدیل می‌شوند. بنابراین حذف این مورفولوژی از آستنیت در این نوع فولادها امری بسیار ضروری است [۵-۷]. کربن یکی از پایدارکننده‌های فریت در ساختار فولاد است و می‌تواند باعث به تعویق افتادن استحاله بینیتی شود. از این رو برای کاهش زمان استحاله بینیتی می‌توان کربن را در این نوع فولادها کاهش داد ولی از مشکلاتی که کاهش کربن در تولید این نوع فولادها می‌تواند ایجاد کند کاهش پایداری آستنیت باقی‌مانده و افزایش دمای شروع استحاله مارتنزیتی<sup>۲</sup> (Ms) می‌باشد [۸]. گزارش شده است که عملیات حرارتی آستمپرینگ دو مرحله‌ای توانسته موجب توزیع ظریف‌تری از بینیت در ساختار گردد و خواص مکانیکی از جمله استحکام کشش تا ۱۵۶۰ مگاپاسکال و افزایش طول نسبی تا ۱۳/۵ درصد در این نوع فولادها افزایش یافته است [۵].

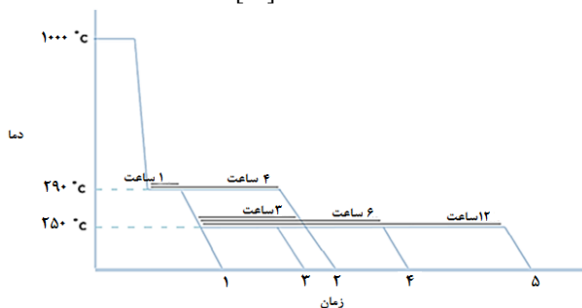
در شکل (۱) شماتیکی از عملیات آستمپرینگ دو مرحله‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از آستنیت‌کردن نمونه‌ها، آنها را در دمایی بالاتر از دمای Ms ترکیب اولیه فولاد در کوره نگه داشته تا اولین مرحله استحاله هم‌دمای بینیتی انجام شود. با انجام این استحاله، مقدار کربن آستنیت باقی‌مانده افزایش یافته و با افزایش استحکام آن، دمای استحاله مارتنزیتی (Ms) کاهش می‌یابد. برای اجرای مرحله دوم عملیات حرارتی، دمای نمونه‌ها را تا دمایی بالاتر از دمای Ms آستنیت باقی‌مانده کاهش می‌دهیم. به‌طور دقیق‌تر می‌توان بیان نمود که در مرحله اول استحاله هم‌دمای بینیت، صفحات فریت بینیتی جوانه زده و رشد می‌کند و پس از رشد مقداری از فریت‌های بینیتی به دلیل نفوذ کربن به زمینه آستنیت و همچنین افزایش پایداری آستنیت باقی‌مانده در دمای پایین‌تر و کاهش Ms، می‌توانیم این مرحله از عملیات حرارتی را متوقف کنیم و مرحله بعدی را در دمایی پایین‌تر ادامه دهیم که این کاهش دما خود باعث حصول نتایجی بدین شرح می‌شود: ۱- تشکیل لایه‌های نازک‌تری از فریت بینیتی به دلیل کاهش سرعت و میزان نفوذ کربن، ۲- پایدار کردن آستنیت و جلوگیری از تشکیل مارتنزیت در

<sup>2</sup>Martensite Start<sup>1</sup>Maraging Steel

حرارتی با توجه به نمودار  $^2$ TTT فولاد مورد نظر که توسط نرم افزار MUCG83 به دست آمد [۱۲] و در شکل (۲) نشان داده شده است، ابتدا نمونه ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه آستینته شده سپس در کوره حمام نمک قرار داده شده اند تا در بازه های زمانی ۱ تا ۱۲ ساعت در دمای بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد، استحاله هم دمای بینیتی یک و دومرحله ای انجام شود. جزئیات انجام این عملیات حرارتی به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود نمونه ها پس از آستینته کردن در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، به مدت یک ساعت در کوره حمام نمک در دمای ۲۹۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرند. نمونه ۱ پس از یک ساعت از کوره خارج شده و در هوا سرد شد و نمونه ۲ پس از چهار ساعت از کوره خارج شده و در هوا سرد شد. نمونه های ۳، ۴ و ۵ پس از یک ساعت نگهداری در دمای ۲۹۰ درجه سانتی گراد به کوره حمام نمک دیگری در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد منتقل شدند و به ترتیب هر کدام پس از ۳ و ۶ و ۱۲ ساعت از کوره خارج و در هوا سرد شدند.



شکل ۲. نمودار TTT به کار گرفته شده در این تحقیق با استفاده از نرم افزار MUCG83 [۱۲].



شکل ۳. شماتیک عملیات حرارتی های اجرا شده بر روی نمونه ها.

جهت آماده سازی نمونه ها برای بررسی های ریزساختاری ابتدا سطح نمونه ها توسط سنباده های ۸۰ تا ۳۰۰۰

ساختار نهایی به دلیل آنکه وجود مارتنزیت در ساختار نهایی باعث کاهش شدید چقرمگی می شود و ۳- افزایش درصد کربن در آستینیت باقی مانده که باعث افزایش استحکام آستینیت شده و از رشد عرضی فریت ها در زمینه آستینیت جلوگیری می کند [۹-۱۱].



شکل ۱. تصویر شماتیک آستمپرینگ دومرحله ای [۵].

## ۲- روش تحقیق

درصد عناصر آلیاژی فولاد مورد استفاده در این تحقیق

در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق.

عنصر	C	Si	Mn	Cr	Al	Fe
درصد وزنی	۰/۴۸	۱/۶	۲/۱	۰/۹۳	۱	Bal.

فولاد مورد نظر در کوره القایی ذوب و سپس در قالب

Y شکل به ظرفیت ۱۰ کیلوگرم ریخته گری شد. شمش تهیه شده جهت دستیابی به فولادی تمیز و بدون حفره، تحت تصفیه سرباره الکتریکی (ESR) قرار گرفت. به منظور کاهش ضخامت و اصلاح ریزساختار غیرهمگن ریخته گری، شمش در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت دهی گردید و بلافاصله توسط دستگاه نورد طی ۶ مرحله با کرنش های تقریبی برابر از ضخامت ۱۵۰ میلی متر تا ضخامت ۱۱ میلی متر کاهش ضخامت داده شد.

از شمش نورد داغ شده، نمونه هایی به ابعاد ۱۰ میلی متر × ۱۰ میلی متر × ۲۰ میلی متر توسط ماشینکاری آماده گردیدند و جهت از میان بردن ساختار تغییر شکل ناشی از نورد، نمونه ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد آستینته شده و سپس در کوره تا دمای محیط سرد شدند. برای انجام عملیات

شکل (۵) میکروساختار نمونه‌ها که در زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای قرار گرفته‌اند را توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان می‌دهد. ریزساختار به دست آمده شامل بسته‌های بینیتی است که این بسته‌ها خود از لایه‌های نانومتری فریت بینیتی و دو مورفولوژی از آستنیت باقی‌مانده، یعنی فیلم‌های نازک آستنیت باقی‌مانده در میان لایه‌های فریت و آستنیت‌های بلوکی تشکیل شده‌اند. شکل ۵-الف نمونه شماره ۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌بینی شده بود در این مرحله از فرآیند به دلیل تکمیل نشدن استحاله و همچنین بالا بودن دمای عملیات حرارتی، لایه‌های ضخیم‌تری از فریت بینیتی مشاهده می‌شود و همچنین آستنیت‌های باقی‌مانده بلوکی نیز به مقدار زیادی در ریزساختار دیده می‌شوند. شکل ۵-ب ریزساختار نمونه ۲ را نشان می‌دهد که به مدت چهار ساعت در همان دمای نمونه ۱ نگهداری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان عملیات حرارتی، آستنیت‌های موجود در زمینه کاهش یافته و صفحات بینیتی در زمینه افزایش یافته است.

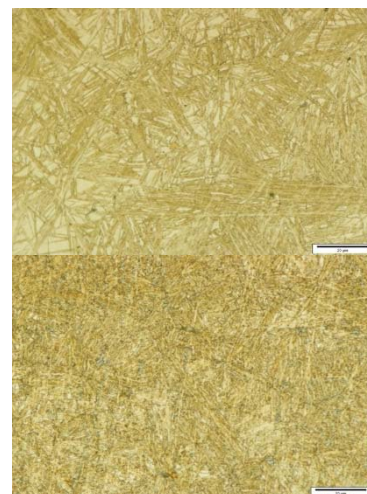
شکل (۶) ریزساختار نمونه‌ها را که در زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی دو مرحله‌ای قرار گرفته‌اند توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان می‌دهد. شکل ۶-الف مربوط به نمونه شماره ۳ می‌باشد که پس از یک ساعت طی کردن مرحله اول استحاله به مدت سه ساعت جهت انجام مرحله دوم استحاله در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده است. همان‌طور که از مقایسه این تصویر با تصاویر شکل (۵) مشهود است، با دو مرحله‌ای شدن استحاله و کاهش دمای مرحله‌ی دوم صفحات موجود در ساختار ظریف‌تر شده‌اند که این امر می‌تواند به دلیل کاهش نفوذ کربن و همچنین افزایش استحکام آستنیت باقی‌مانده و ممانعت از رشد عرضی صفحات فریت باشد [۱۳].

در شکل ۶-ب ریزساختار نمونه ۴ که شش ساعت جهت تکمیل استحاله بینیتی در مرحله دوم نگهداری شده است و در شکل ۶-ج ریزساختار نمونه ۵ که ۱۲ ساعت در مرحله دوم نگهداری شده است نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان استحاله در مرحله دوم، میزان آستنیت‌های باقیمانده بلوکی کاهش یافته و به لایه‌های نازک فریت و آستنیت غنی از کربن تبدیل شده است.

سنباده خورده و در نهایت سطح آن‌ها توسط نمک و محلول آلومینا هفت میکرومتر پولیش گردید. به منظور اچ کردن شیمیایی نمونه‌ها از نایتال ۲٪ وزنی استفاده شد و ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری Olympus مدل PM63 با حداکثر بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۱</sup> (FESEM) مدل TESCAN MIRA 3 مورد مطالعه قرار گرفت. جهت مقایسه میزان فریت‌های بینیتی تشکیل شده و آستنیت باقی‌مانده از پراش پرتو ایکس<sup>۲</sup> XRD استفاده شد. برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها، از آزمون کشش با نرخ کرنش دو میلی‌متر بر دقیقه و براساس استاندارد ASTM E8 و جهت تعیین سختی از آزمون سختی سنجی ویکرز با بار ۳۰ کیلوگرم نیرو استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

بررسی ریزساختار: شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه شماره ۱ و ۵ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با دو مرحله‌ای شدن استحاله (شکل ۴-ب) صفحات ظریف‌تر شده‌اند. همچنین می‌توان آستنیت باقی‌مانده بلوکی را در ساختار تشخیص داد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه ۱ به دلیل تکمیل نشدن استحاله، مقدار زیادی از آستنیت بلوکی قابل رویت است ولی به دلیل آن‌که از لحاظ کمی نمی‌توان ساختارهای فریت بینیتی نانومتری را با میکروسکوپ نوری تشخیص داد، بررسی با میکروسکوپ الکترونی ضروری است.



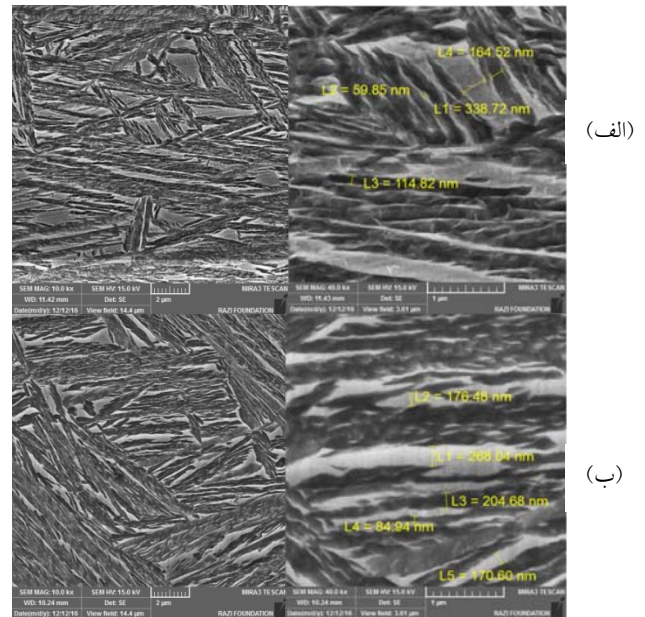
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری از الف) نمونه ۱ (آستمپرینگ تک‌مرحله‌ای) و ب) نمونه ۵ (آستمپرینگ دو مرحله‌ای).

<sup>1</sup>Field Emission Scanning Electron Microscope  
<sup>2</sup>X-ray Diffraction

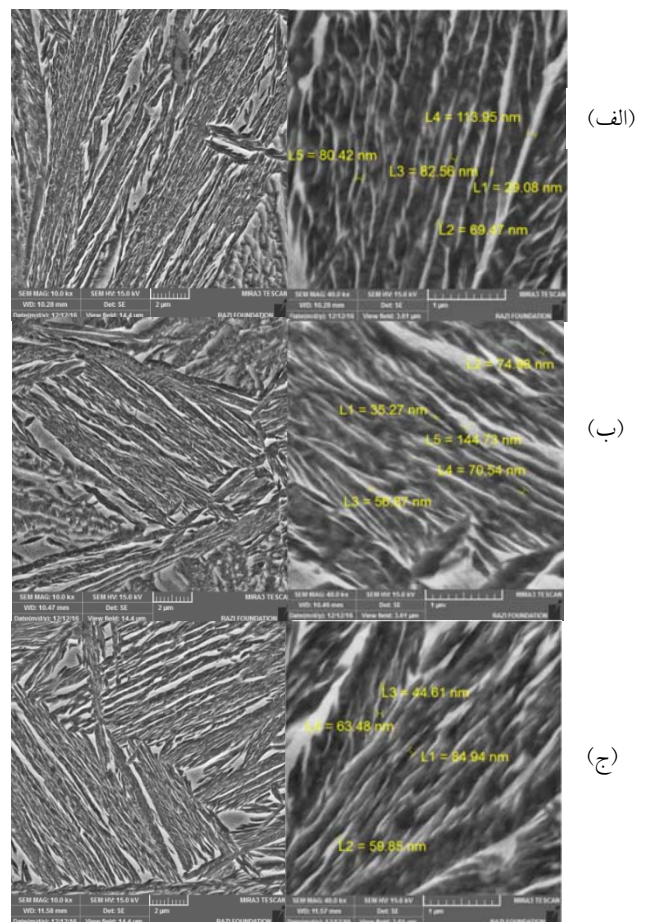
همچنین ضخامت صفحات بینیتی که در مرحله اول تشکیل شده‌اند کمتر از ۲۰۰ نانومتر می‌باشد ولی در مرحله دوم با کاهش دما از رشد این صفحات ضخیم‌تر جلوگیری شده و لایه‌های نازک با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر در این دما جوانه زده و رشد کرده‌اند.

از دلایل جلوگیری از رشد صفحات ضخیم‌تر در دمای پایین‌تر این است که با کاهش دما قدرت نفوذ کربن کاهش یافته و نمی‌تواند از صفحات ضخیم‌تر خارج شود پس در عمل رشد صفحات ضخیم‌تر پایان می‌یابد. با ادامه یافتن استحاله در مرحله دوم ساختار یکپارچه‌ای از بینیت تشکیل شده است که نشان‌دهنده تکمیل استحاله می‌باشد و نمونه‌های پایانی، یکنواختی ساختاری بهتری را نشان می‌دهند که این یکنواختی می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی شود.

**فازیابی:** در شکل (۷) منحنی حاصل از پراش پرتو ایکس نشان داده شده است. منحنی اول مربوط به نمونه ۱ (آستمپرینگ تک‌مرحله‌ای) می‌باشد که پیک‌های کامل مشخصی در ناحیه مربوط به صفحات آستنیت مشاهده شد، که این گواهی بر وجود میزان آستنیت قابل ملاحظه‌ای در این نمونه می‌باشد که از تصاویر میکروسکوپی نیز همین نتایج قابل استنتاج بود. منحنی‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نشان‌دهنده نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان استحاله (نمونه ۲) در دمای آستمپرینگ مشابه نمونه اول، پیک‌های مربوط به صفحات فریت نسبت به نمونه اول افزایش و پیک‌های آستنیت کاهش یافته‌اند که همین موضوع در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز مشاهده گردید. نمونه‌های ۳ و ۴ تحت عملیات دو مرحله‌ای قرار گرفته‌اند با این تفاوت که نمونه ۳، سه ساعت و نمونه ۴، شش ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با پیشرفت استحاله به روش دو مرحله‌ای، پیک‌های مربوط به صفحات آستنیت کاهش یافته و پیک‌های صفحات فریت بینیتی افزایش می‌یابد. به بیان دیگر حجم فریت بینیتی افزایش یافته و حجم آستنیت‌های اولیه باقی‌مانده کاهش یافته که با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی در شکل (۶) نیز این امر تایید می‌شود و این خود نشان دهنده بینیتی شدن فولاد مورد نظر بیش از ۹۰٪ در این روش است. باید خاطر نشان کرد که میزان حجم آستنیت‌ها کاهش



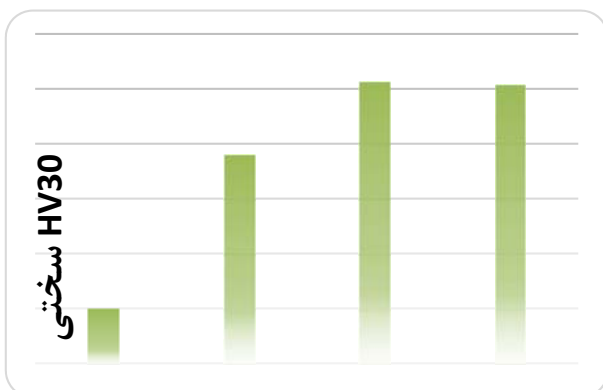
شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه‌های آستمپر شده به روش تک‌مرحله‌ای که با دو بزرگ‌نمایی نشان داده شده‌اند (لایه‌های تیره رنگ در تصویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده فریت و زمینه روشن نشان‌دهنده آستنیت می‌باشد)؛ الف) نمونه شماره ۱، ب) نمونه شماره ۲.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه‌های آستمپر شده به روش دو مرحله‌ای که با دو بزرگ‌نمایی نشان داده شده‌اند؛ الف) نمونه ۳، ب) نمونه ۴، ج) نمونه ۵.

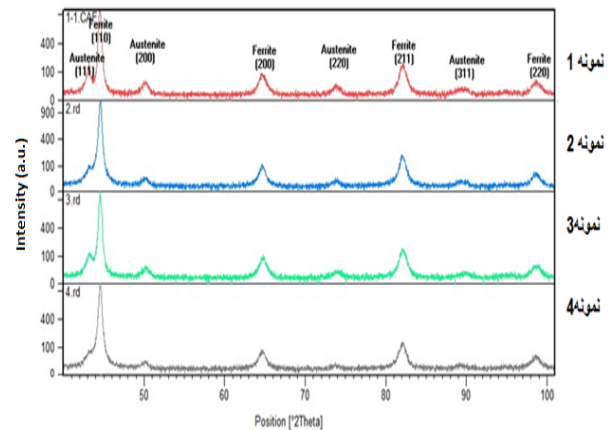
بهبود خواص مکانیکی کمک می‌نماید. تولید ورقه‌های غنی از کربن آستنیتی و هم‌چنین فریت‌های بینیتی ظریف‌تر و جایگزین شدن این ساختار به‌جای آستنیت بلوکی نیز در اصلاح خواص مکانیکی از اهمیت فراوانی برخوردار است [۵]. با مقایسه نمونه های ۳ و ۴ می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش زمان آستمپرینگ دوما مرحله‌ای تاثیر چندانی بر استحکام و انعطاف پذیری نمی‌گذارد و تصاویر میکروسکوپی الکترونی شکل ۶ هم تفاوت چندانی میان این نمونه ها نشان ندادند.

**سختی سنجی:** شکل (۹) تغییرات سختی نمونه‌ها که به روش ویکرز انجام شده را نشان می‌دهد. مشابه با نتایج آزمون کشش در این‌جا نیز سختی نمونه‌های آستمپر شده بسیار بالاتر از نمونه اولیه می‌باشند به نحوی که سختی نمونه شماره ۲ که به مدت چهار ساعت طی عملیات حرارتی تک‌مرحله‌ای قرار گرفته، حدود یک و نیم برابر نمونه آیل است. در نمونه ۳ که آستمپرینگ دوما مرحله‌ای را طی نموده سختی نسبت به نمونه تک‌مرحله‌ای افزایش یافته است. این افزایش سختی که با کمک کاهش دما در مرحله دوم حاصل می‌شود به این دلیل است که در دماهای پایین نیرو محرکه جوانه زنی بالا رفته و استحکام آستنیت افزایش می‌یابد که این امر سبب کاهش ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی می‌شود. از دیگر عوامل کاهش دما افزایش کسر حجمی لایه‌های نازک آستنیت و کاهش کسر حجمی آستنیت بلوکه شده می‌باشد که باعث افزایش کسر حجمی فریت بینیتی می‌شود [۵]. اما سختی نمونه شماره ۴ تفاوت چندانی با نمونه شماره ۳ نداشته است و مشابه با نتایج آزمون کشش و بررسی ریزساختار، افزایش زمان آستمپرینگ دوما مرحله‌ای تاثیر مثبتی بر خواص مکانیکی نمی‌گذارد.



شکل ۹. نتایج سختی سنجی ویکرز.

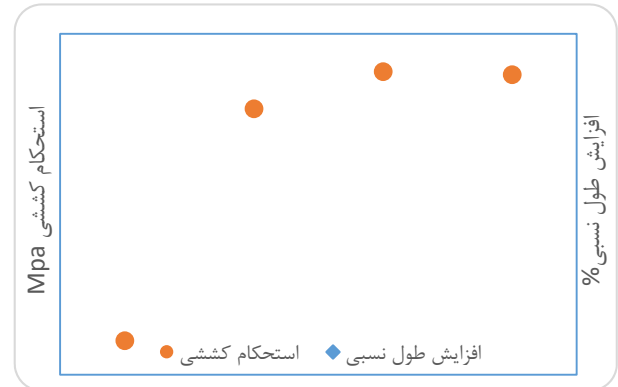
یافته ولی به دلیل نفوذ کربن استحکام آن افزایش می‌یابد.



شکل ۷. مقایسه پیک‌های XRD نمونه‌های ۱ تا ۴.

**آزمون کشش:** در شکل (۸) نتایج حاصل از آزمون

کشش و تغییرات افزایش طول نسبی و استحکام در نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ که ساختار بینیتی دارند نسبت به نمونه آیل شده، بدون آن‌که کاهش چندانی در افزایش طول نسبی از خود نشان بدهند، استحکام بسیار بالاتری دارند.



شکل ۸. نتایج آزمون کشش.

بنابراین خواص مکانیکی بهبود قابل توجهی یافته و این نوع فولادها می‌توانند در کاربردهای با استحکام بالا به‌کار گرفته شوند. با جایگزینی آستمپرینگ دوما مرحله‌ای (نمونه‌های ۳ و ۴) به‌جای عملیات مرسوم آستمپرینگ (نمونه ۲) توانسته‌ایم استحکام را بهبود بخشیم در حالی که درصد افزایش طول نسبی نیز تغییر چندانی نکرده است. این امر به دلیل آن است که هم در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۶ و هم از نتایج XRD میزان آستنیت بلوکه اولیه در نمونه‌های ۳ و ۴ کاهش یافته و میزان بینیت افزایش می‌یابد و این تغییرات به

## ۴- نتیجه گیری

## مراجع

1. Bhadeshia, H.K.D.H., High performance bainitic steels, *Materials Science Forum*, 500 (2005) 63-74.
2. Bhadeshia, H.K.D.H., Nanostructured bainite, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466 (2113) 3-18.
3. Lee, Y.K., et al., Effect of isothermal transformation temperature on amount of retained austenite and its thermal stability in a bainitic Fe-3% Si-0.45% C-X steel, *Scripta Materialia*, 47 (12) (2002) 805-809.
4. podder, A.S., *Tempering of a Mixture of Bainite and Retained Austenite*, University of Cambridge, 2011.
5. Wang, X.L., Wu, K.M., Hu, F., Yu, L., Wan, X.L., Multi-step isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel, *Scripta Materialia*, 74 (2014) 56-59.
6. Garcia-Mateo, C., Caballero, F., Bhadeshia, H., Acceleration of Low-Temperature Bainite, *ISIJ International*, 43 (2003) 1821-1825.
7. Hu, F., P. D. Hodgson, and K. M. Wu. "Acceleration of the super bainite transformation through a coarse austenite grain size." *Materials letters* 122 (2014): 240-243.
8. Li, H.Y., Lu, X.W., Wu, X.C., Min, Y.A., Jin, X.J., Bainitic transformation during the two-step quenching and partitioning process in a medium carbon steel containing silicon, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (2010) 6255-6259.
9. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H., Development of hard bainite, *ISIJ international*, 43 (2003) 1238-1243.
10. Bhadeshia, H.K.D.H., *Bainite in steels: transformation, microstructure and properties*, London: The Institute of Materials, University of Cambridge, (2001) 377-382.
11. Zhang, M., Wang, T.S., Wang, Y.H., Yang, J., Zhang, F.C., Preparation of nanostructured bainite in medium-carbon alloy steel, *Materials Science and Engineering: A*, 568 (2013) 123-126.
12. [www.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html](http://www.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html).
13. Keyto, S., Influence of Alloying Elements on Steel Microstructure, Key to Steel Web Site. Actualizada en septiembre del, (2001).

۱- در این پژوهش نشان داده شد با کاهش درصد کربن به دلیل کاهش دمای تحول بینیتی می توان در زمان های بسیار کوتاه تری توسط عملیات آستمپرینگ به ساختار تمام بینیتی نانو ساختار دست یافت. حداکثر زمان به کار گرفته شده در این تحقیق ۱۲ ساعت می باشد

۲- از مقایسه آزمون های پراش پرتو ایکس، کشش و سختی سنجی با تصاویر میکروسکوپ الکترونی می توان نتیجه گرفت که فولاد تشکیل شده از صفحات بینیتی نانو ساختار نسبت به فولاد اولیه خواص مکانیکی قابل توجهی از خود نشان می دهند.

۳- توسط عملیات حرارتی دومرحله ای با کاهش دمای استحاله در مرحله دوم به دلیل افزایش استحکام آستنیت و نیروی محرکه جوانه زنی، از افزایش ضخامت صفحات بینیتی جلوگیری شده و با توجه به نتایج XRD کسر حجمی فریت بینیتی افزایش یافته است. تصاویر ریزساختاری نیز گواهی بر این ادعاست که با دومرحله ای کردن فرآیند و کاهش دمای استحاله، ضخامت صفحات فریت بینیتی کاهش یافته است. برای مقایسه خواص مکانیکی می توان به افزایش استحکام کششی ۲۰ درصدی و افزایش سختی ۱۲ درصدی نسبت به عملیات حرارتی تک مرحله ای اشاره کرد.

۴- افزایش زمان آستمپرینگ دومرحله ای تاثیر چندانی بر ریزساختاری نداشته و در نتیجه استحکام کششی و سختی نمونه نیز چندان تحت تاثیر قرار نمی گیرد. در نتیجه آستمپرینگ دومرحله ای کوتاه مدت، تاثیر بسیار قابل توجهی بر خواص مکانیکی ماده می گذارد و یک فولاد کربن متوسط را به رده فولادهای استحکام بالای آلیاژی یا پرکربن نزدیک می نماید.