

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## Effect of heat treatment on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel

### Abstract

In this study, the effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of 17-4 PH stainless steel has been studied. To do this, samples for metallography, hardness and tensile tests were prepared. Test specimens were heat treated in cycles H900, H1025, H1150, austempering at 230° C and 300 ° C for two hours and full annealing. Tensile tests were carried out on specimens after H900, full annealing and austempering treatments. Experimental findings showed that aging treatment increased the strength and hardness while it slightly reduced ductility. Austempering process improved strength but decreased ductility, significantly. Optimum strength and hardness were obtained after aging treatment at 480 °C; the alloy had a fine microstructure under this process.

**Keywords:** 17-4 PH stainless steel, Heat treatment, Aging, Mechanical properties.

## تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن 17-4 PH

### چکیده

در این پژوهش، تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد 17-4 PH بررسی شده است. برای انجام این کار، نمونه‌هایی برای آزمون‌های سختی، متالوگرافی و کشش تهیه شد. نمونه‌های آزمون سختی و متالوگرافی تحت سیکل‌های عملیات حرارتی پیرسازی در دماهای ۴۸۰ درجه سانتیگراد (H900)، ۵۵۰ درجه سانتیگراد (H1025)، ۶۲۰ درجه سانتیگراد (H1150)، آستمپرینگ در دماهای ۲۳۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت و آنیل کامل قرار گرفتند. نمونه‌های آزمون کشش تحت عملیات H900، آنیل کامل و آستمپرینگ در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته و همراه با نمونه خام آزمایش شدند. یافته‌های آزمایش نشان داد که عملیات پیرسازی سبب افزایش استحکام و سختی می‌شود و در عین حال انعطاف پذیری را به مقدار اندکی کاهش می‌دهد. عملیات آستمپرینگ موجب افزایش استحکام می‌شود ولی انعطاف پذیری را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. پیرسازی در دمای ۴۸۰ درجه سانتیگراد حداکثر سختی و استحکام را پدید آورد؛ ساختار آلیاژ در این شرایط شامل رسوبات بسیار ریز مس در زمینه‌ی مارتنزیت تمپر شده است.

واژه‌های کلیدی: فولاد 17-4 PH، عملیات حرارتی، پیرسازی، خواص مکانیکی.

## مقدمه

فولادهای زنگ نزن، گروهی از آلیاژهای پایه آهنی هستند که مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون بالایی از خود نشان می‌دهند. این نوع از فولادها ابتدا در سال ۱۹۶۰ معرفی شدند و سپس کاربرد آنها به‌طور پیوسته افزایش یافته است. مهم‌ترین مشخصه‌های این فولادها استحکام بالا، شکل‌پذیری نسبتاً خوب و مقاومت به خوردگی استثنایی آنهاست (Tavakoli shoushtari, 2010). دسته‌ای از این آلیاژها، فولادهای زنگ نزن رسوب سخت شونده هستند که به علت خواص برجسته کاربرد در صنایع و تجهیزات به خود اختصاص داده‌اند. آلیاژ 17-4 PH، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی رسوب سخت شونده است که دارای ترکیب استثنایی از استحکام بالا، مقاومت به خوردگی خوب، خواص مکانیکی عالی تا حدود دمای ۳۲۰ درجه سانتیگراد و چقرمگی مناسب، هم در حالت معمولی و هم در حالت جوشکاشته است. از سوی دیگر، این فولاد دارای زمان و دمای عملیات پیرسازی نسبتاً پایینی است که باعث حداقل اعوجاج و تاب برداشتن قطعات تولید شده از این آلیاژ می‌شود (AK steel corporation, 2007).

از آنجا که فولاد 17-4 PH استفاده گسترده‌ای در صنایع دریایی و هوافضا دارد، خواص مکانیکی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و از جمله عواملی که بر خواص مکانیکی تاثیرگذار است، عملیات حرارتی می‌باشد. در تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است، محققین سیکل‌های عملیات حرارتی پیشنهادی برای این فولاد را که همان پیرسازی است و در کتب مرجع و استانداردها آورده شده است انجام ریزساختار حاصل‌دسته از این فولاد شامل زمینه مارتنزیت تمپر شده به همراه رسوبات ریز مس و مقداری فریت دلتا است و با توجه به اندازه و توزیع این ذرات، خواص مکانیکی تغییر می‌کند. از سوی دیگر، برخی از خواص مکانیکی وجود دارند که در ریزساختارهای خاصی بسیار بهبود می‌یابند اما تا بحال در این فولاد مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. به همین دلیل در این تحقیق سه سیکل عملیات حرارتی جدید روی این فولاد انجام شده و تاثیر آنها بر ریزساختار و خواص مکانیکی در این پژوهش بررسی و با فرایندهای قبلی مقایسه شده است.

## پیشینه پژوهش

در زمینه‌ی بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی مطالعاتی انجام شده است که به چند مورد آن اشاره می‌شود. در مورد اول (Caligiana, Ceschini, Garagnani, 2005) بعد از انجام عملیات حرارتی مشخص شد که میکروساختار ماده‌ی پیرنشده شامل مارتنزیت و گاهی فاز فریت دلتا است. در شرایط عملیات حرارتی شده آلیاژ حاوی مقداری آستنیت باقیمانده است. کسر فاز فریت دلتا از ۵ تا ۱۰ درصد و اندازه دانه‌ی آستنیت در محدوده ۲۵-۳۰ میکرومتر متغیر است. عملیات پیرسازی بین ۴۸۰ و ۵۱۰ درجه سانتیگراد احتمالاً ذرات رسوبی نوع  $M_{23}C_6$  را در مرز تیغه‌های مارتنزیت ایجاد می‌کند. تشکیل فاز FCC غنی از مس نیز برای فولاد 17-4 PH در این دماهای پیرسازی گزارش شده است. در نمونه‌های پیرشده به مدت ۱ ساعت بین ۵۴۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد

تبدیل مارتنزیت تقریباً به طور کامل انجام می‌گیرد. آلیاژ پیرشده در ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت مقدار معینی آستنیت عمدتاً در مرز تیغه‌ها را نیز نشان داده است.

در پژوهش دیگری (Viswanathan, Banerjee, Krishnan, 1988) نیز نتایج مشابهی گزارش شده که می‌توان آنها را به این صورت خلاصه کرد. کوئنچ کردن آلیاژ از دمای انحلالی منجر به تشکیل مارتنزیت تیغه‌ای می‌شود؛ تیغه‌های مارتنزیت عاری از دوقلویی‌های داخلی بوده و چگالی نابجایی بالایی دارند. تبدیل آستنیت به مارتنزیت در آلیاژ کونچ شده که حدود ۵٪ فریت دلتا دارد تقریباً کامل می‌شود؛ هیچ آستنیت باقیمانده‌ای در آلیاژ کونچ شده دیده نمی‌شود. چند پدیده در خلال عملیات پیرسازی رخ می‌دهد؛ (۱) باز آرایشی نابجایی‌ها در تیغه‌های مارتنزیت، (۲) افزایش اولیه سختی احتمالاً به خاطر تشکیل مناطق غنی از مس، (۳) تشکیل رسوبات FCC غنی از مس در دماهای پیرسازی بالای ۴۷۰ درجه سانتیگراد، (۴) تشکیل فاز کاربید، (۵) تشکیل مارتنزیت به طور بارزی در طول مرز تیغه‌ها در طی پیرسازی در ۵۸۰ درجه سانتیگراد و بالاتر از آن.

همچنین در یک تحقیق (چالاکی، جبارزاده و ابوطالبی، ۱۳۸۵)، مشخص شده است که دمای مناسب انحلال ۱۰۳۰ درجه سانتیگراد و دمای پیرسختی ۴۸۰ درجه سانتیگراد است. انجام تغییر شکل پلاستیک روی نمونه‌ها قبل از پیرسازی، موجب افزایش استحکام و سختی شده و زمان رسیدن به حداکثر سختی را به یک چهارم کاهش می‌دهد.

#### مواد و روش انجام آزمایش‌ها

ابتدا فولاد مورد نظر با ترکیب جدول ۱ خریداری شد. برای انجام آزمون سختی و متالوگرافی، نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل با سطح مقطع دایره‌ای به قطر ۱۰ mm و طول ۱ cm تهیه شد. به همین منظور میله‌های فولادی توسط دستگاه برش دیسکی در طول‌های ۱ cm بریده شدند. نمونه‌های کشش طبق استاندارد E\_08 M ساخته شد. جهت بررسی رفتار آلیاژ در عملیات جدید و از آنجا که رفتار آن در حداکثر سختی مدنظر بود، تنها برای دمای پیرسازی ۴۸۰ درجه سانتیگراد، دمای آستمپر ۳۰۰ درجه سانتیگراد، نمونه‌ی خام (جهت مقایسه) و آنیل کامل، نمونه‌ی کشش ساخته شد و جهت اطمینان از درستی نتایج، برای هر سیکل عملیات حرارتی ۳ نمونه مورد آزمون قرار گرفت.

جدول ۱- ترکیب فولاد 17-4 PH

عنصر	C	S	Cr	Ni	Si	Mn	Cu	Nb	Mo	Fe
درصد وزنی	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۵/۹	۴/۱	۰/۵	۰/۷	۳/۳	۰/۲۴	۰/۱	باقیمانده

نمونه‌های تهیه شده در ۸ گروه ۳ تایی دسته بندی شدند که ۷ گروه از آنها تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و یک دسته نیز نمونه های خام بود که برای مقایسه خواص قبل و بعد از عملیات تهیه شده بود. ابتدا ۴ دسته نمونه در دمای ۱۰۳۰ درجه سانتیگراد به مدت نیم ساعت آستنیت شده و تحت عملیات آنیل انحلالی در محیط روغن کونچ شدند. سه دسته از این نمونه‌ها در دماهای ۴۸۰، ۵۵۰ و ۶۲۰ درجه سانتیگراد به ترتیب در زمان‌های ۱، ۴ و ۴ ساعت تحت عملیات H900، H1025 و H1150 پیر شدند. یک دسته از نمونه‌ها در دمای ۱۰۳۰ درجه سانتیگراد به مدت نیم ساعت آستنیت شده و تحت عملیات آنیل کامل در کوره سرد شدند. برای انجام عملیات آستمپر با توجه به دمای MS حدود ۱۰۵ درجه سانتیگراد برای این فولاد دو دما در نظر گرفته شد. ابتدا هر دسته در دمای ۱۰۳۰ درجه سانتیگراد به مدت نیم ساعت آستنیت شده و سپس سریعاً به داخل حمام نمک مذاب فرو برده می‌شد که دسته‌ی اول در دمای ۲۳۰ درجه سانتیگراد و دسته‌ی دوم در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت آستمپر شدند.

جهت انجام متالوگرافی و مطالعه‌ی ریزساختار، نمونه‌های عملیات حرارتی شده به روش مانت سرد آماده سازی شد. نمونه های آماده سازی شده بعد از سنباده زنی و پولیش به وسیله‌ی محلول فرای<sup>۱</sup> اچ شدند و توسط میکروسکوپ نوری ریز ساختار آنها بررسی گردید. از هر دسته از نمونه‌های عملیات حرارتی شده، یک نمونه جهت انجام آزمون سختی انتخاب شد. سختی نمونه‌ها با روش ویکرز اندازه گیری شد. برای اطمینان از صحت اطلاعات به طور میانگین هر نمونه ۵ بار سختی سنجی شد و میانگین آنها به عنوان عدد سختی ثبت گردید.

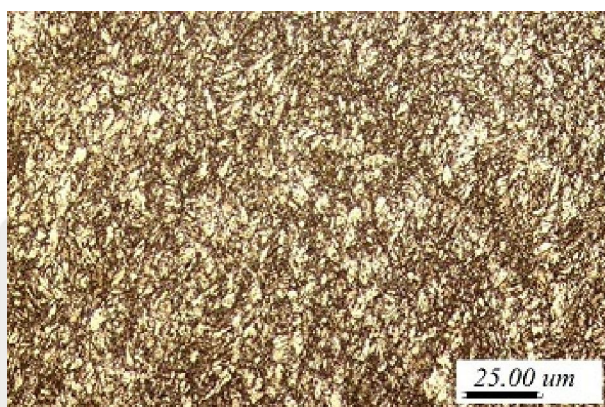
## یافته‌ها و بحث

### ساختار فولاد 17-4 PH

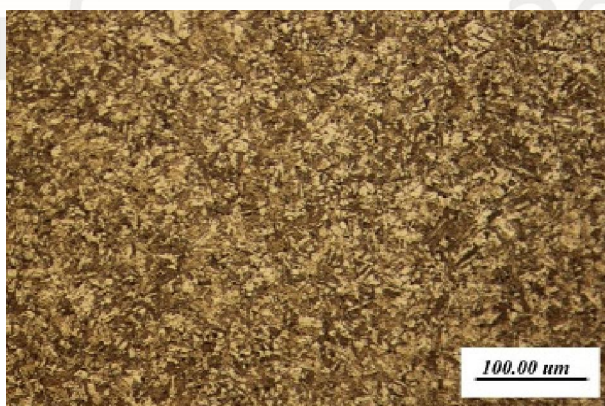
<sup>1</sup> Fry's reagent



همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ساختار فولاد اولیه شامل مارتنزیت لایه‌ای کم کربن است. ساختار بسیار ریز است که به دلیل فرایند تولید فولاد است؛ این ریزساختار سختی و استحکام بالایی به همراه دارد. پس از آنیل انحلالی، ساختار شامل مارتنزیت لایه‌ای کم کربن و مقداری کمی فریت دلتا است. همانطور که از مقایسه‌ی شکل‌های ۱ و ۲ مشخص است، ساختار نسبت به حالت اولیه درشت‌تر شده است.

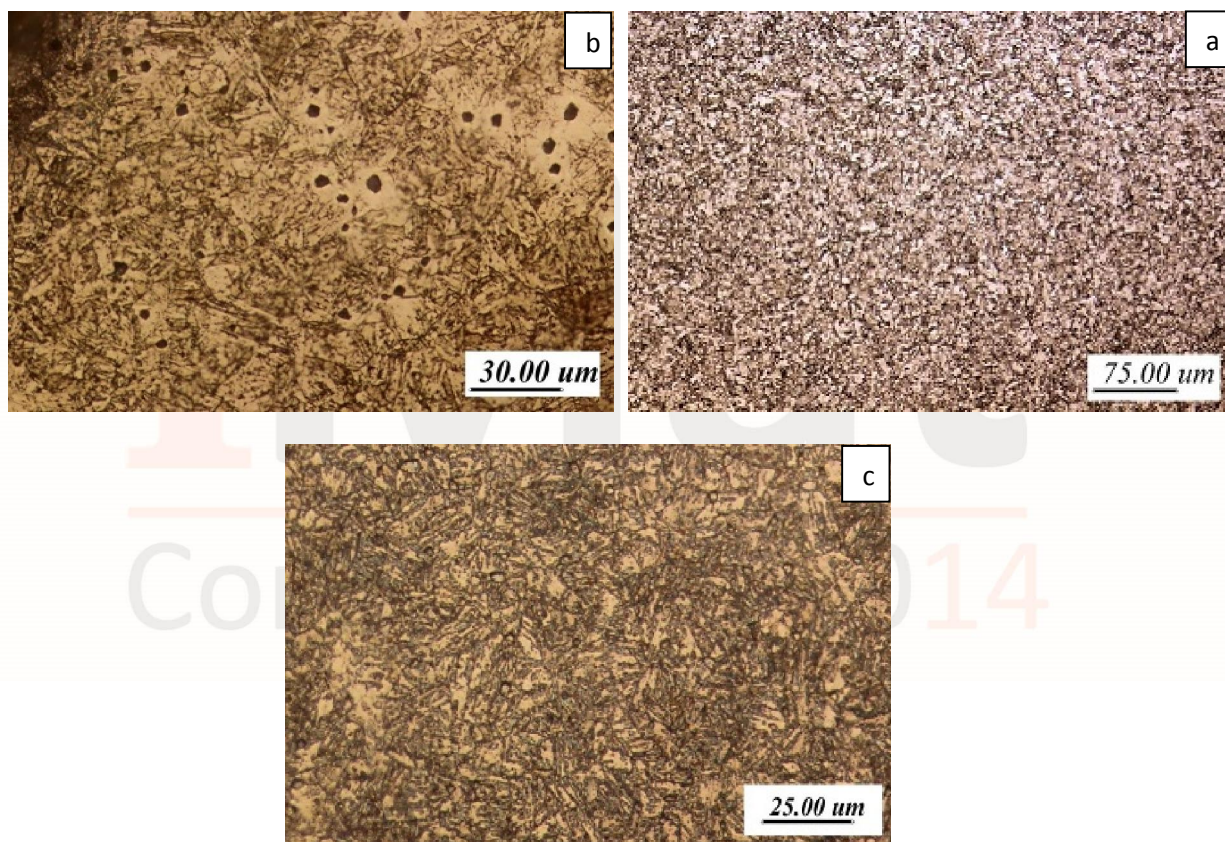


شکل ۱- ریزساختار نمونه خام.



شکل ۲- ریزساختار نمونه فولاد پس از آنیل انحلالی.

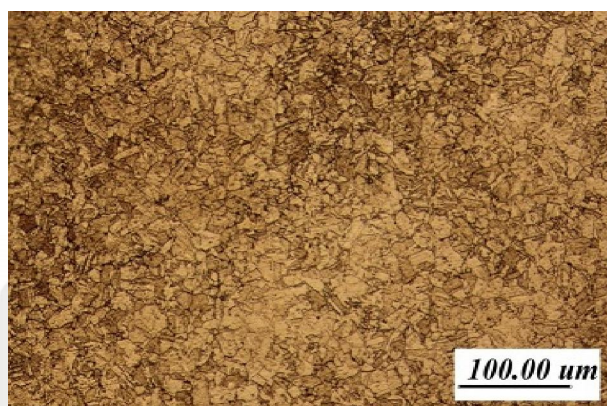
ریزساختار نمونه‌های پیرسازی شده پس از عملیات H900، H1025، و H1150 در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که از تصاویر متالوگرافی نمونه‌های پیرشده مشخص است، عملیات پیرسازی باعث تمپر شدن مارتنزیت زمینه شده ولی به دلیل درصد کربن پایین فولاد، تاثیر کمی روی خواص آن دارد و تغییر خواص مکانیکی صرفاً به خاطر تشکیل رسوبات ریز مس است. ساختار در این حالت شامل زمینه‌ی مارتنزیت تمپر شده حاوی رسوبات ریز مس به همراه مقدار کمی آستنیت باقیمانده است. به دلیل قدرت بزرگنمایی کم میکروسکوپ نوری رسوبات تشکیل شده در این تصاویر قابل مشاهده نیستند.



شکل ۳- ریزساختار نمونه‌های پیر شده تحت عملیات (a) H900، (b) H1025، (c) H1150.

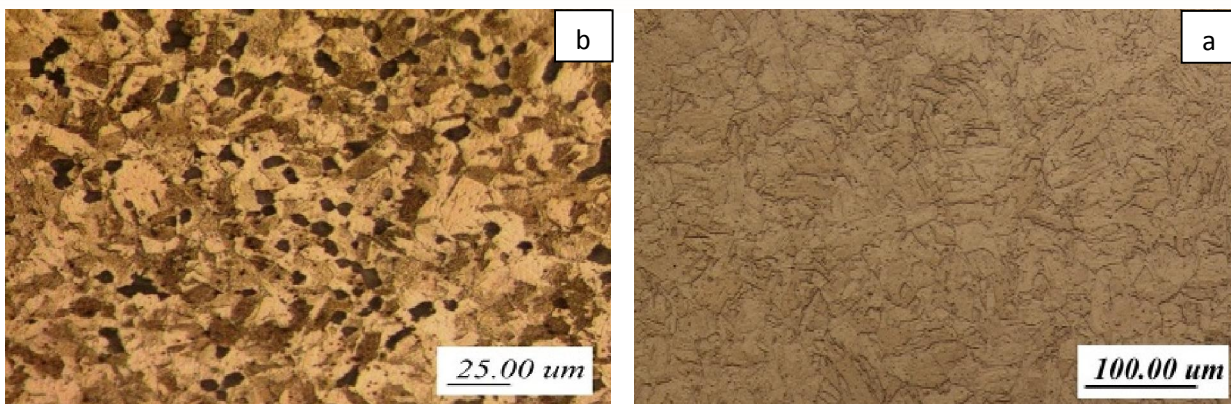


ریزساختار نمونه آنیل کامل در شکل ۴ آورده شده است. با مقایسه‌ی شکل ۴ و ۱ مشاهده می‌شود که نمونه‌ی آنیل کامل دارای ساختار درشت دانه‌تری است که به خاطر بزرگ شدن اندازه دانه‌های آستنیت در حین عملیات و سرعت کم سرد شدن حاصل شده است. ساختار شامل مارتنزیت تمپر شده همراه با رسوبات مس در زمینه است.



شکل ۴- ریزساختار نمونه‌ی آنیل کامل.

ریزساختار نمونه‌های آستمپر شده در دماهای ۲۳۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد که به مدت ۲ ساعت انجام گرفت، در شکل ۵ دیده می‌شود. انتظار می‌رود ساختار نمونه‌های آستمپر شده بینیت بالایی باشد. اجزای ساختار بینیتی بسیار ریز است و میکروسکوپ نوری عموماً قدرت تفکیک آن را ندارد.



شکل ۵- ریزساختار نمونه‌های آستمپر شده در دمای (a) ۲۳۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت، (b) ۳۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت.

## ارزیابی خواص مکانیکی

نتیج آزمون سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده در جدول ۲ آورده شده است. از مقایسه‌ی مقادیر سختی بدست آمده (شکل ۶)، مشاهده می‌شود که حداکثر سختی مربوط به عملیات H900 است. از سوی دیگر، نمونه‌ی آنیل انحلالی شده کمترین سختی را در بین نمونه‌ها دارد که این امر به دلیل عدم تشکیل رسوبات در این مرحله است. با توجه به شکل ۶ (a) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای پیرسازی سختی کاهش می‌یابد؛ این امر به دلیل پدیده‌ی بزرگ شدن رسوبات است. سختی نسبتاً بالای نمونه‌ی آنیل کامل به خاطر تشکیل رسوبات ریز مس در حین سرد شدن است و همانطور که مشاهده می‌شود سختی این نمونه از سختی نمونه‌ی H1150 نیز بیشتر است. این امر با ریزساختار نمونه H1150 که حاوی رسوبات نسبتاً درشتی است هماهنگی دارد.

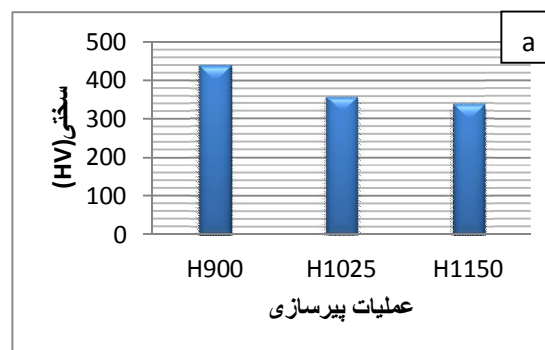
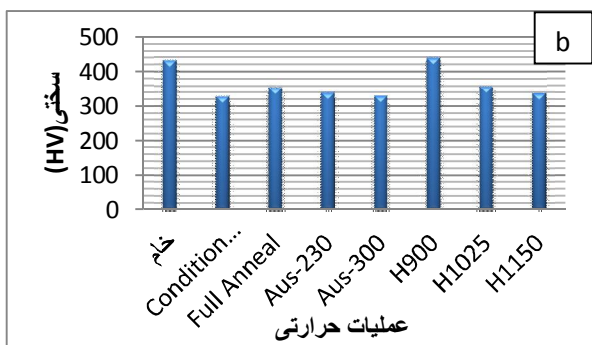
پس از ساخت نمونه‌های کشش و انجام عملیات حرارتی، آزمون کشش روی نمونه‌ها انجام شد که نمودارهای آن در شکل ۷ ارائه شده است. بررسی خواص مکانیکی حاصل از آزمون‌های سختی و کشش نمونه‌ها احتمال ساختار بینیتی را افزایش داد زیرا با توجه به شکل ۶، سختی نمونه‌های آستمپر شده با سختی نمونه‌ی آنیل انحلالی شده تقریباً یکسان است؛ احتمال می‌رود این افزایش سختی به خاطر تشکیل رسوبات و ذرات کاربیدی در حین عملیات آستمپرینگ باشد و تفاوت زیادی بین مقادیر سختی وجود ندارد. با مشاهده شکل ۸ انعطاف پذیری کمتر نمونه‌های آستمپر شده نسبت به نمونه‌های پیرشده احتمال حاصل شدن ساختار بینیتی را محتمل‌تر می‌سازد.

از مقایسه‌ی شکل ۸ (a) با شکل ۸ (b) مشاهده می‌شود که بعد از عملیات پیرسازی، استحکام به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است در حالی که انعطاف پذیری به مقدار ناچیزی کاهش یافته است. بنابراین با انجام عملیات پیرسازی چقرمگی ماده افزایش می‌یابد و خواص مکانیکی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا می‌کند. شکل ۸ نشان می‌دهد که عملیات آستمپرینگ روی این فولاد باعث افزایش استحکام می‌شود ولی در عین حال انعطاف پذیری را کاهش می‌دهد لذا برای مواردی که شکل‌پذیری مد نظر باشد، توصیه نمی‌شود.

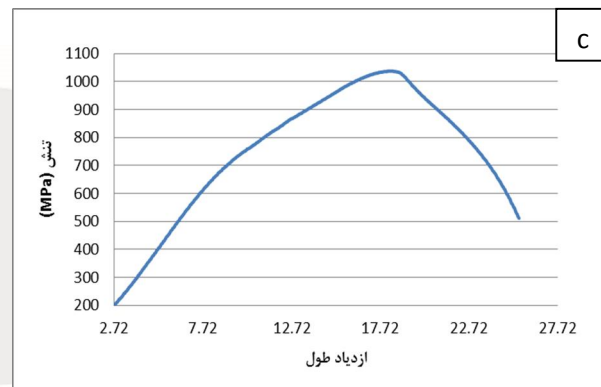
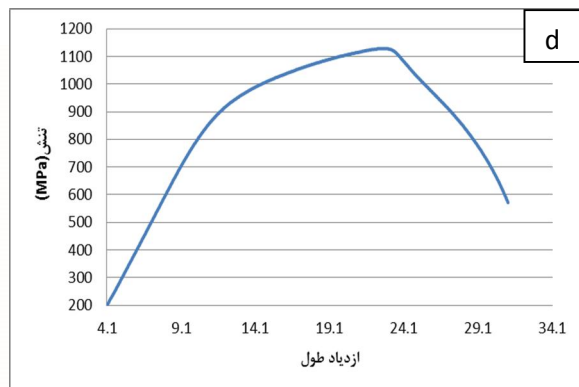
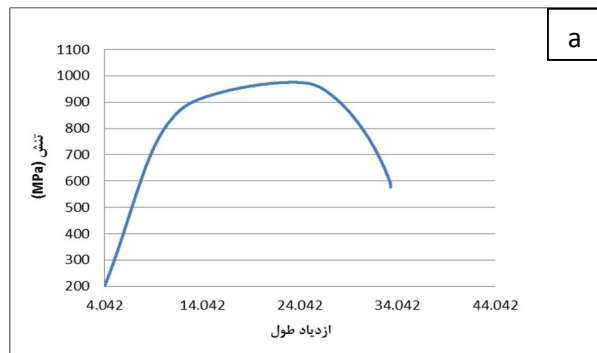
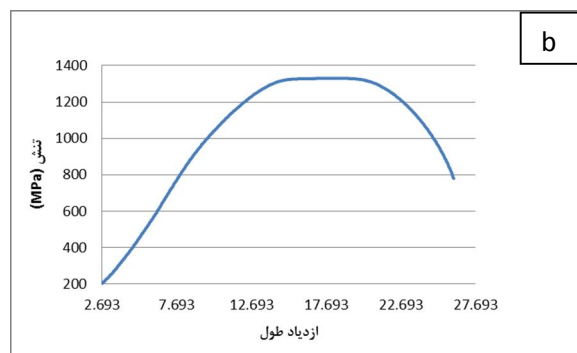
با توجه به شکل ۸ (b) نمونه‌ی H900 بیشترین انعطاف‌پذیری را در بین نمونه‌های عملیات حرارتی شده دارد و با توجه به شکل ۸ (a) بیشترین استحکام را نیز داراست، در نتیجه بیشترین مقدار چقرمگی مربوط به این نمونه خواهد بود. این پدیده، به دلیل توزیع یکنواخت رسوبات مس در زمینه آلیاژ است که در خلال عملیات پیرسازی تشکیل می‌شوند.

جدول ۲- نتایج سختی سنجی نمونه های عملیات حرارتی شده

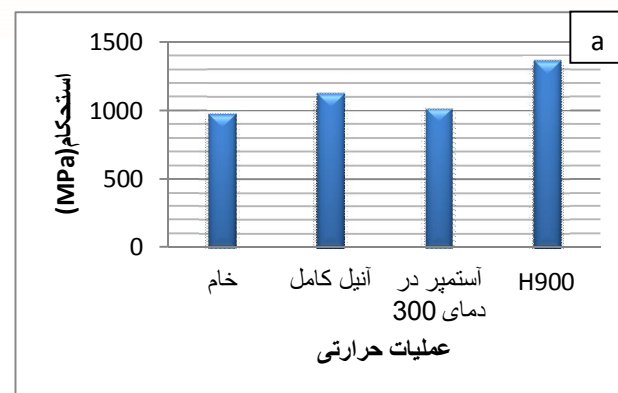
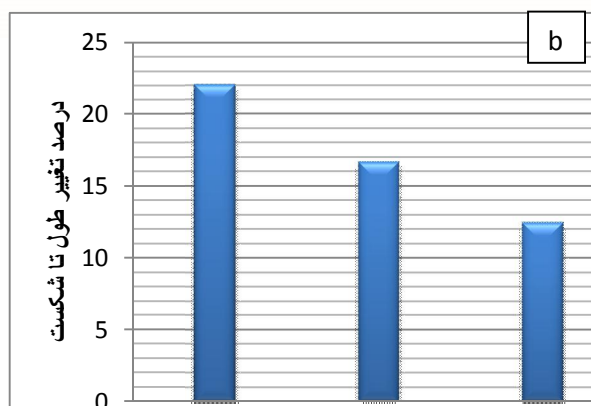
نمونه	دمای عملیات (سانتیگراد)	سختی میانگین (HV)
خام	-	۴۳۳±۱۱
آنیل انحرالی، کوئنچ در روغن	۱۰۳۰	۳۳۰±۱۰
آنیل کامل	۱۰۳۰	۳۵۶±۱۰
آستمپرینگ	۲۳۰	۳۴۰±۷
آستمپرینگ	۳۰۰	۳۳۲±۶
پیر سازی	۴۸۰	۴۴۰±۱۷
پیر سازی	۵۵۰	۳۵۹±۱۳
پیر سازی	۶۲۰	۳۳۸±۱۱



شکل ۶- (a) تاثیر دمای پیر سازی بر سختی، (b) سختی فولاد PH 17-4 بر حسب نوع عملیات حرارتی.



شکل ۷- نمودارهای تنش کرنش: (a) نمونه خام (b) نمونه H900 (c) نمونه آستمپر شده در دمای ۳۰۰ (d) نمونه آنیل کامل.



شکل ۸- تاثیر نوع عملیات حرارتی بر (a) استحکام نهایی، (b) انعطاف‌پذیری فولاد PH 17-4.



## نتیجه گیری

۱. حداکثر سختی و استحکام مربوط به عملیات H900 است که در آن فولاد 17-4 PH پس از آنیل انحلالی در ۴۸۰ درجه سانتیگراد، تحت پیرسازی قرار می‌گیرد.
۲. عملیات H900 سختی و استحکام را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد ولی انعطاف پذیری را به مقدار ناچیزی کاهش می‌دهد.
۳. عملیات آنیل کامل به دلیل تشکیل رسوب در این فولاد برای کاهش سختی پیشنهاد نمی‌شود زیرا انعطاف پذیری کافی ندارد.
۴. عملیات آستمپرینگ سختی را افزایش می‌دهد ولی انعطاف‌پذیری را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

## منابع

- Viswanathan. U.K , Banerjee. S, Krishnan. R .(1988). " Effects of aging on the microstructure of 17-4 PH stainless steel"  
. Materials Science and Engineering. Volume 104. Pages 181-189
- Tavakoli Shoushtari.M.R . (2010)." Effect of ageing heat treatment on corrosion behavior of 17-4 PH stainless steel in 3.5% NaCl". International Journal of ISSI, Vol.7. No.1, pp.33-36.
- AK Steel Corporation. (2007). " product data sheet (17-4PH stainless steel)" AK Steel Corporation.
- Caligiana, G., Ceschini, L., Garagnani, G.L., (1990) "Effect of aging on fracture toughness parameters and tensile properties of 17-4 PH stainless steel", Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures, D. Firrao ed., EMAS Ltd. Publ., U.K., Vol. 1, 410-416.

مجتبی چالاکی، پژمان جبارزاده و محمدرضا ابوطالبی. (۱۳۸۵). "تاثیر سیکل عملیات حرارتی رسوب سختی بر خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی 17-4 PH". دهمین کنگره‌ی سالانه انجمن مهندسين متالورژی ايران.