

# تأثیر پارامترهای فرایند کوئنچ و پارتیشن بندی بر ریزساختار و کسر آستنیت باقی مانده

عبدالله شیرعلی\*، عباس هنربخش رئوف و سهیلا بزاز بنابی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱)

**چکیده** - مقدار معین آستنیت باقی مانده، انعطاف پذیری فولادها را به دلیل پدیده TRIP در طول تغییر شکل پلاستیک، افزایش می دهد. یک روش برای دست یابی به مقدار قابل توجه آستنیت باقی مانده در فولاد، پارتیشن بندی کربن به آستنیت است که باعث پایداری آستنیت در دمای اتاق می شود. عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن بندی (Q&P) با استفاده از این روش، منجر به ریزساختاری شامل مارتنزیت و آستنیت باقی مانده پایدار شده بین صفحات مارتنزیت می شود و بنابراین ترکیب بهتری از استحکام و انعطاف پذیری را فراهم می کند. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فرایند Q&P (دمای کوئنچ، دمای پارتیشن بندی و زمان پارتیشن بندی) بر ریزساختار و کسر آستنیت باقی مانده یک فولاد کربن متوسط کم آلیاژ بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش زیاد زمان پارتیشن بندی، موجب از بین رفتن تیغه های مارتنزیت و کاهش کسر آستنیت می شود. با افزایش دمای پارتیشن بندی، لایه های آستنیت باقی مانده ضخیم تر می شود و کسر حجمی آستنیت باقی مانده افزایش می یابد. از طرف دیگر، با افزایش دمای کوئنچ، غلظت کربن آستنیت باقی مانده به شدت افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: Q&P، پارتیشن بندی، ریزساختار، آستنیت باقی مانده، مارتنزیت

## Influence of Parameters of Quenching and Partitioning Process on Microstructure and Fraction of Retained Austenite

A. Shirali\*, A. Honarbakhsh Raouf and S. Bazzaz Bonabi

Faculty of Metallurgy and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

**Abstract:** *Certain amount of retained austenite can increase ductility of steels because of the TRIP phenomenon during plastic deformation. One method for achieving this is partitioning of carbon into austenite to stabilize it at room temperature. The quenching and partitioning (Q&P) heat treatment leads to a microstructure consisting of martensite and stabilized retained austenite between martensite plates, which provides a better combination of strength and ductility. In this study, the effect of parameters of Q&P process (quenching temperature, partitioning temperature and partitioning time) on the microstructure and retained austenite volume fraction of a low alloy medium carbon steel was investigated. The results showed that the high increase in partitioning time causes the disappearance of martensite blades and reduction of austenite volume fraction. However, increasing*

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.shirali90@yahoo.com

of partitioning temperature made the retained austenite films become thicker and its volume fraction increase. On the other hand, by increasing the quenching temperature, carbon content of retained austenite increased sharply.

**Keywords:** Equal Q&P, Partitioning, Microstructure, Retained Austenite, Martensite

## ۱- مقدمه

در چند دهه گذشته، فولادهای میکروآلیاژی کم آلیاژ استحکام بالا، فولادهای مارتنزیتی و فولادهای دوفازی با استحکام بالاتر از فولادهای C-Mn، مورد توجه قرار گرفته‌اند. از طرفی، فولادهای استحکام بالای پیشرفته (AHSS) که دارای یک زمینه فریت-بینیت با مقادیر کمی مارتنزیت و آستنیت باقی مانده‌اند نیز به دنبال آن توسعه یافته‌اند. این فولادها با عنوان فولادهای با پلاستیسیته ناشی از دگرگونی فازی (TRIP)، ترکیبی از انعطاف‌پذیری و استحکام بالا را نشان می‌دهند. فولادهای با پلاستیسیته ناشی از دوقلویی شدن (TWIP)، نسل دوم فولادهای AHSS هستند که انعطاف‌پذیری و استحکام بالا را از طریق ریزساختار بر پایه آستنیت ایجاد کرده‌اند. به طور کلی فولادهای دارای مقدار قابل توجه آستنیت باقی مانده، در طول کرنش‌دهی با افزایش در نرخ کرنش سختی، به تدریج به مارتنزیت تبدیل می‌شوند، به طوری که این فولادها با ترکیب انعطاف‌پذیری بالا-استحکام بالا شناخته شده‌اند. در واقع، مقدار معین آستنیت باقی مانده، به عنوان جزء بحرانی فولادهای تجاری، می‌تواند انعطاف‌پذیری و چقرمگی فولادها را به دلیل پدیده TRIP در طول تغییرشکل پلاستیک، افزایش دهد. روش سنتی برای دستیابی به مقدار قابل توجه آستنیت باقی مانده با کرنش افزوده در فولاد، افزایش مقدار کربن فولاد است، زیرا کربن تأثیر شدیدی بر کاهش دمای شروع مارتنزیت و افزایش پایداری آستنیت دارد. اگرچه، مقدار کربن زیاد در فولاد برای انعطاف‌پذیری و قابلیت جوش‌کاری، مضر است. در این زمینه، در سال ۲۰۰۳، اسپیر<sup>۱</sup> و همکارانش یک فرایند عملیات حرارتی جدید را بر مبنای نفوذ کربن از مارتنزیت به آستنیت باقی مانده تعریف کردند و فرایند با عنوان "کوئنچ و پارتیشن‌بندی (Q&P)" نام‌گذاری شد تا از کوئنچ و تمپر کردن (Q&T) متمایز باشد. فرایند Q&P در نسل سوم AHSS طبقه‌بندی

می‌شود [۱-۳].

فولادهای کوئنچ و پارتیشن‌بندی شده، معمولاً شامل آستنیت پایدار شده پر کربن و مارتنزیت تخلیه شده از کربن است که با هم، باعث افزایش استحکام بدون به‌خطر افتادن انعطاف‌پذیری می‌شوند. در فرایند Q&P، کنترل کامل کسر مارتنزیت (فاز قوی) و افزایش کربن آستنیت، امکان‌پذیر است.

فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی شامل چهار مرحله است:

(۱) آستنیت کردن کامل یا جزئی،

(۲) کوئنچ سریع تا دمای پایین‌تر از دمای شروع مارتنزیت ( $M_s$ ) اما بالاتر از دمای پایان مارتنزیت ( $M_f$ ) برای تولید کسر حجمی کنترل شده مارتنزیت فوق اشباع و آستنیت تبدیل نشده، (۳) پارتیشن‌بندی بعدی در دمای کوئنچ (عملیات تک مرحله‌ای) یا بالاتر از دمای  $M_s$  (عملیات دو مرحله‌ای) برای نفوذ کامل کربن از مارتنزیت به آستنیت باقی مانده. در طول این مرحله، با تخلیه کربن لایه‌های مارتنزیت، کربن آستنیت افزایش می‌یابد و اجازه پایداری آستنیت در دمای اتاق را می‌دهد و (۴) کوئنچ تا دمای اتاق که آستنیت با پایداری کم‌تر به مارتنزیت تبدیل می‌شود، در حالی که آستنیتی که به قدر کافی کربنش افزایش یافته باشد در دمای اتاق باقی می‌ماند [۴-۶].

در نتیجه ریزساختار پایانی شامل فریت (در مورد آستنیت کردن جزئی)، مارتنزیت و آستنیت باقی مانده است. البته ریزساختار فولاد پس از کاربرد فرایند Q&P، به پارامترهای عملیات حرارتی (دمای کوئنچ: QT، زمان کوئنچ: Qt، دمای پارتیشن‌بندی: PT و زمان پارتیشن‌بندی: Pt) و ریزساختار اولیه پیش از کاربرد فرایند بستگی دارد. مقدار آستنیت پایانی ممکن است در کوئنچ تا دمای اتاق اصلاح شود، که بستگی به پایداری آستنیت به دست آمده در طول مرحله پارتیشن‌بندی دارد [۷ و ۸].

برای دستیابی به ریزساختاری شامل مارتنزیت و آستنیت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد 1.5142 (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo	Al	Co	Cu	Fe
۰/۶۳۹	۰/۹۹۳	۱/۰۳	۰/۳۰۵	۰/۱۳۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۳۳	۰/۰۲۵	۰/۰۱	۰/۰۹۹	بقیه

پارامترهای فرایند) این فولاد کربن متوسط کم آلیاژی که تحت فرایند Q&P عملیات حرارتی شده مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- روش پژوهش

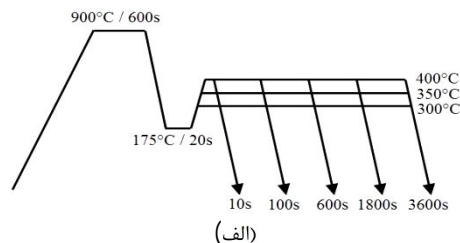
با توجه به محدودیت‌های ترکیب شیمیایی در فرایند Q&P، در این پژوهش، فولاد با استاندارد 1.5142 انتخاب شد. جدول ۱ نشان‌دهنده ترکیب شیمیایی این فولاد است.

برای انجام عملیات حرارتی، نیاز به تعیین دماهای بحرانی است. دماهای بحرانی را با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد و با استفاده از روابط تجربی می‌توان محاسبه کرد. به‌عنوان مثال، دمای شروع مارتنزیت ( $M_s$ ) با استفاده از رابطه تجربی [۹]،  $256^\circ\text{C}$  به‌دست آمد.

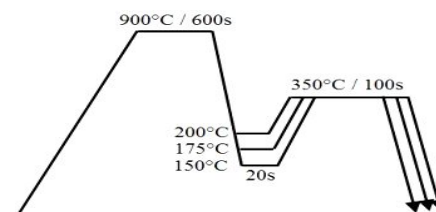
$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 542.5 - 350\text{C} - 45\text{Mn} - 30\text{Cr} - 20\text{Ni} - 5\text{Si} \quad (۱)$$

پس از برش نمونه‌هایی با طول و قطر به‌ترتیب ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر از ماده اولیه و تعیین دماهای بحرانی، فرایند Q&P روی نمونه‌های مختلف انجام شد. مرحله آستنیت‌دهی کامل در دمای  $900^\circ\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه در یک کوره الکتریکی و مرحله کوئنچ در دماهای  $150^\circ\text{C}$ ،  $175^\circ\text{C}$  و  $200^\circ\text{C}$  به مدت ۲۰s در یک حمام نمک انجام شد. مرحله پارتیشن‌بندی در دماهای  $30^\circ\text{C}$ ،  $35^\circ\text{C}$  و  $40^\circ\text{C}$  و زمان‌های متفاوت و با استفاده از حمام نمک مرکب از نیترات پتاسیم و نیترات سدیم با درصد وزنی مشخص انجام شد. کوئنچ پایانی تا دمای اتاق، در آب انجام گرفت.

در واقع عملیات به دو فاز تقسیم شد. فاز اول شامل QT (دمای کوئنچ) ثابت، PT (دمای پارتیشن‌بندی) متغیر و Pt (زمان پارتیشن‌بندی) متغیر بود که تأثیر مرحله پارتیشن‌بندی بررسی شد. شکل ۱- الف، نشان‌دهنده عملیات Q&P طراحی شده با



(الف)



(ب)

شکل ۱- شکل نمادین چرخه‌های طراحی شده برای:

الف) فرایند Q&P با دمای کوئنچ ثابت و ب) فرایند Q&P با شرایط پارتیشن‌بندی ثابت

باقی‌مانده، بایستی دگرگونی آستنیت به فریت و یا بینیت و هم‌چنین رسوب کاربید در طول مرحله پارتیشن‌بندی، کاملاً متوقف شود. بنابراین فولاد باید دارای عناصر آلیاژی مثل منگنز و سیلیسیم باشد. هم‌چنین فولاد مورد استفاده در فرایند Q&P بایستی دارای مقدار کربن بالا برای مرحله پارتیشن‌بندی و پایدارسازی حرارتی آستنیت باقی‌مانده در دمای اتاق باشد، زیرا مقدار کربن بالاتر منجر به پایداری بهتر آستنیت باقی‌مانده پایانی در طول سرد کردن تا دمای اتاق می‌شود [۵].

از آن جایی که گزارش‌های انگشت‌شماری در مورد عملیات Q&P برای فولادهای کربن متوسط و به‌ویژه فولاد 1.5142 وجود دارد، در این پژوهش، رفتار فیزیکی و مکانیکی (ریزساختار و کسر آستنیت باقی‌مانده با تغییر

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریزساختار

شکل ۲، ریزساختارهای فولاد را پس از انجام فرایند Q&P در دمای پارتیشن‌بندی  $350^{\circ}\text{C}$  و زمان‌های متفاوت نشان می‌دهد. در این شکل، جزء تیره، مارتنزیت و جزء روشن، آستنیت باقی‌مانده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آستنیت باقی‌مانده به‌شکل لایه‌های نازک بین تیغه‌های مارتنزیت و به‌شکل بلوکی موجود است و افزایش زمان پارتیشن‌بندی، به‌تدریج موجب ظریف‌شدن و از بین رفتن تیغه‌های مارتنزیت می‌شود. در زمان‌های پارتیشن‌بندی طولانی (شکل ۲-ت)، ساختار به‌شکل مارتنزیت تمپرشده مشاهده می‌شود که در توافق با پژوهش‌های انجام شده توسط سانتوفیمیا<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۲] است. این مشاهدات نشان می‌دهد که در زمان‌های زیاد پارتیشن‌بندی، پایدارسازی آستنیت باقی‌مانده کاهش می‌یابد.

شکل ۳، ریزساختارهای فولاد را پس از انجام فرایند Q&P در دو دمای پارتیشن‌بندی متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود لایه‌های آستنیت باقی‌مانده موجود در بین لایه‌های مارتنزیت با افزایش دمای پارتیشن‌بندی، رشد می‌کند و ضخیم‌تر می‌شود. کاهش آستنیت باقی‌مانده در دماهای پارتیشن‌بندی پایین، به‌دلیل رقابت با رسوب کاربید است.

شکل ۴، ریزساختارهای فولاد را پس از انجام فرایند Q&P در دو دمای کوئنچ متفاوت برای بررسی تأثیر مرحله کوئنچ در عملیات Q&P نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای کوئنچ، به‌دلیل نزدیک شدن به دمای  $M_s$  میزان فاز مارتنزیت، کاهش و برعکس فاز آستنیت باقی‌مانده افزایش می‌یابد.

#### ۳-۲- کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده

شکل ۵ نشان دهنده الگوی پراش یک نمونه پس از فرایند Q&P است. در این شکل، قله‌های (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۲۲۰) مارتنزیت و قله‌های (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) آستنیت قابل مشاهده است. اگرچه ارتفاع دو قله (۲۲۰) و

دمای کوئنچ ثابت است. فاز دوم شامل PT ثابت، Pt ثابت و QT متغیر بود که اثر کوئنچ با پارتیشن‌بندی ثابت بررسی شد. شکل ۱- ب، نشان‌دهنده عملیات Q&P طراحی شده با شرایط پارتیشن‌بندی ثابت است.

برای مشاهده و بررسی ریزساختار، از میکروسکوپ نوری (OM) استفاده شد. محلول حکاکی مورد استفاده برای متالوگرافی، نایتال ۲٪ بود.

برای تعیین کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده و غلظت کربن این فاز، از تحلیل پراش اشعه X (XRD) استفاده شد. آزمایش‌های پراش اشعه X (XRD) برای نمونه‌های مختلف، در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه Bruker D8 و پرتوی Cu-K با طول موج  $1.5406$  آنگستروم انجام شد. نمونه‌ها در بازه  $2^{\circ}$  از  $30^{\circ}$  تا  $110^{\circ}$  در یک اندازه گام  $0.05^{\circ}$  و  $1\text{s}$  توقف در هر گام، اسکن شد. کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده با استفاده از بازتاب‌های (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) آستنیت و بازتاب‌های (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۲۲۰) فریت (مارتنزیت) و براساس رابطه ۲ محاسبه شد [۱۰].

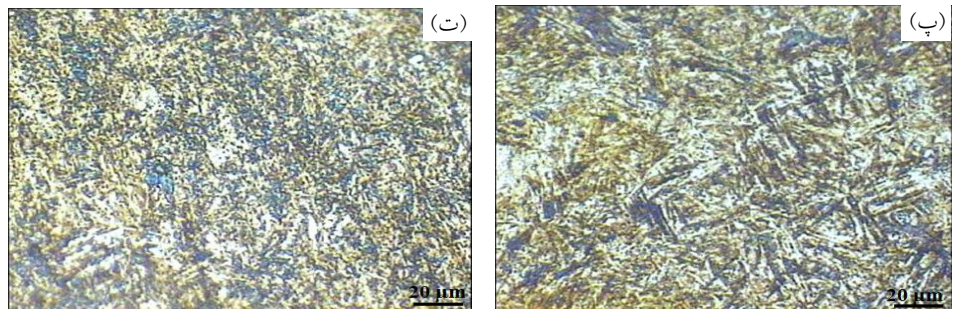
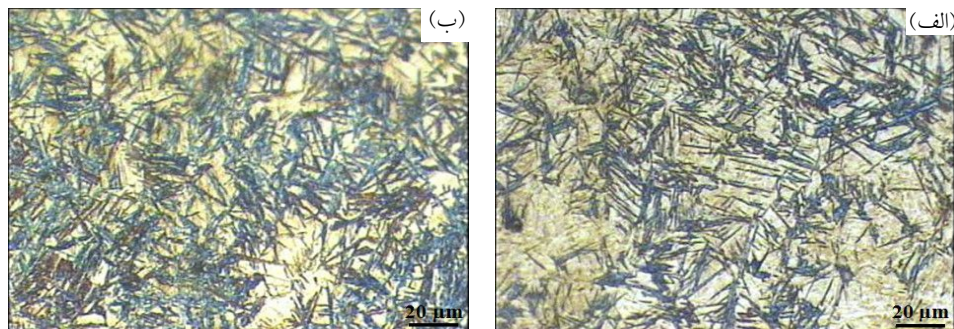
$$V_x = \frac{\left( \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{xj}}{R_{xj}} \right)}{\left( \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{I_{fi}}{R_{fi}} \right) + \left( \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{xj}}{R_{xj}} \right)} \quad (2)$$

که در آن  $V_x$ ، کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده،  $I$  و  $I$  به‌ترتیب شدت قله برای فازهای فریت (مارتنزیت) و آستنیت،  $R$ ، فاکتور شدت نسبی نظری و  $p$  و  $q$  به‌ترتیب تعداد قله‌های پراش برای فازهای فریت و آستنیت است.

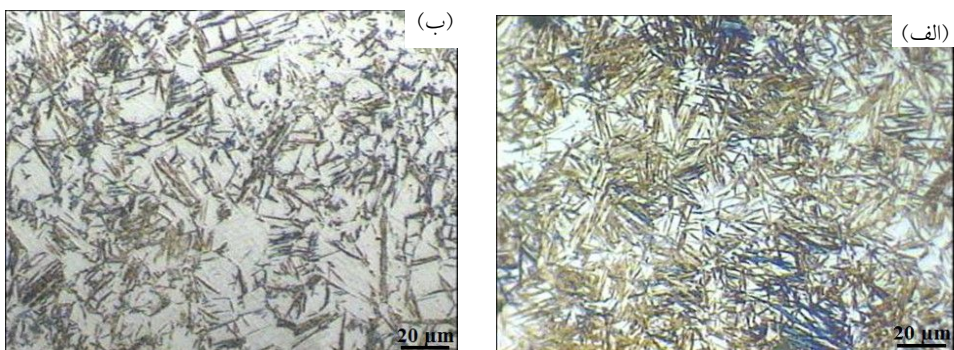
غلظت کربن آستنیت باقی‌مانده با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد [۵].

$$a = 0.3556 + 0.00453x_C + 0.000095x_{Mn} + 0.00056x_{Al} + 0.0006x_{Cr} - 0.0002x_{Ni} \quad (3)$$

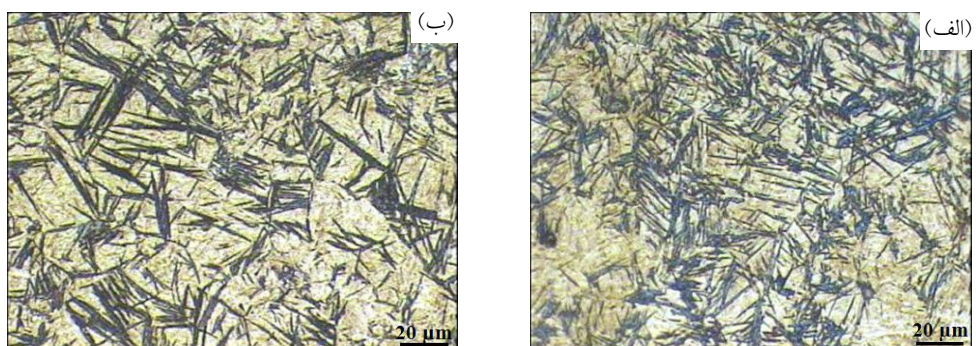
که در آن،  $a$ ، پارامتر شبکه آستنیت برحسب نانومتر است و  $x_C$ ،  $x_{Ni}$ ،  $x_{Cr}$ ،  $x_{Al}$ ،  $x_{Mn}$ ، کروم و نیکل برحسب درصد وزنی هستند. پارامتر شبکه آستنیت با استفاده از روش کوهن<sup>۲</sup> [۱۱] تعیین شد.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فولاد پس از کوئنچ در دمای  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰s و پارتیشن بندی در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  به مدت: الف) ۱۰۰۰s، ب) ۶۰۰s، پ) ۱۸۰۰s و ت) ۳۶۰۰s



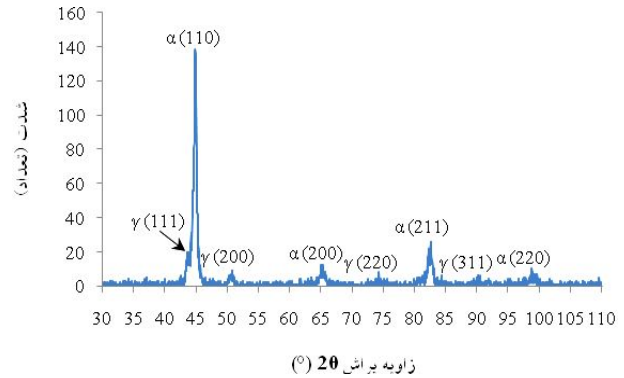
شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فولاد پس از کوئنچ در دمای  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰s و پارتیشن بندی به مدت ۶۰۰s در دمای: الف)  $300^{\circ}\text{C}$  و ب)  $400^{\circ}\text{C}$



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فولاد پس از کوئنچ در دمای: الف)  $175^{\circ}\text{C}$  و ب)  $200^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰s و پارتیشن بندی در دمای  $35^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰۰s

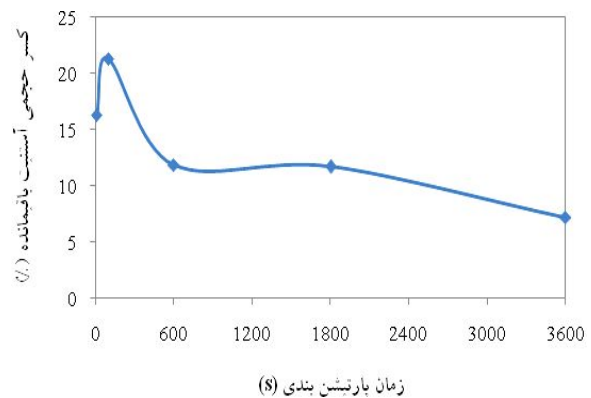
حجمی آستنیت باقی مانده قابل محاسبه است. کسرهای حجمی آستنیت باقی مانده به دست آمده پس از کوئنچ در  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت  $20\text{ s}$  و پارتیشن بندی در  $350^{\circ}\text{C}$  برای زمان های پارتیشن بندی متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است. بایستی اشاره شود که اندازه گیری های کسر حجمی آستنیت در دمای اتاق و نه در دمای پارتیشن بندی انجام شده است و مناطق آستنیت با مقدار کربن کم تر در طول کوئنچ پایانی به مارتنزیت تبدیل می شود. بنابراین منطقی است تا فرض شود که کسر حجمی آستنیت موجود در ریزساختار در دمای پارتیشن بندی، بالاتر از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از اندازه گیری های دمای اتاق خواهد بود. در واقع، هدف مرحله پارتیشن بندی، انتقال کربن از مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت و بنابراین افزایش پایداری گرمایی آستنیت است. شکل ۶، پایدارسازی سریع آستنیت در زمان های بسیار کوتاه را نشان می دهد، که سازگار با سینتیک خروج سریع اتم های کربن از مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت تبدیل نشده، است [۱]. کسر آستنیت پس از پارتیشن بندی به مدت  $10\text{ s}$  مدت  $10\text{ s}$ ،  $16/3\%$  است و پس از پارتیشن بندی به مدت  $10\text{ s}$  به یک مقدار بیشینه  $21/3\%$  می رسد. پس از این زمان کوتاه پارتیشن بندی کربن، با افزایش بیش تر زمان پارتیشن بندی، کسر آستنیت کاهش می یابد، که می تواند به دلیل فرایندهای رقابتی مثل رسوب کاربرد در فصل مشترک های مارتنزیت / آستنیت و یا دگرگونی بینیتی باشد [۱].

شکل ۷، کسر حجمی آستنیت باقی مانده را در دماهای پارتیشن بندی  $300^{\circ}\text{C}$ ،  $350^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$  نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش دمای پارتیشن بندی، کسر حجمی آستنیت باقی مانده نیز افزایش می یابد، زیرا سرعت نفوذ کربن در فولادها با افزایش دما، زیاد می شود [۱۳]. بنابراین نفوذ کربن از مارتنزیت به آستنیت، آسان تر می شود و افزایش کربن در آستنیت در دمای پارتیشن بندی بالا شتاب می گیرد و این فاز در طول سرد کردن پایانی پایدار خواهد ماند. البته در دمای پارتیشن بندی بالاتر و نزدیک به دمای شروع بینیت، احتمال وقوع دگرگونی بینیت و

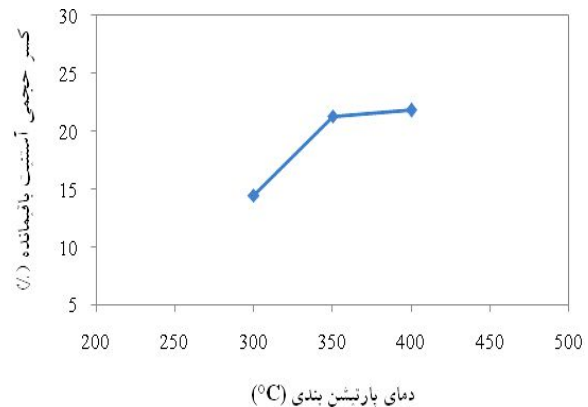


شکل ۵- الگوی پراش نمونه کوئنچ شده در دمای  $175^{\circ}\text{C}$

به مدت  $20\text{ s}$  و پارتیشن بندی شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت  $10\text{ s}$



شکل ۶- تغییر کسر آستنیت باقی مانده به صورت تابعی از زمان پارتیشن بندی



شکل ۷- تغییر کسر آستنیت باقی مانده به صورت تابعی از دمای پارتیشن بندی

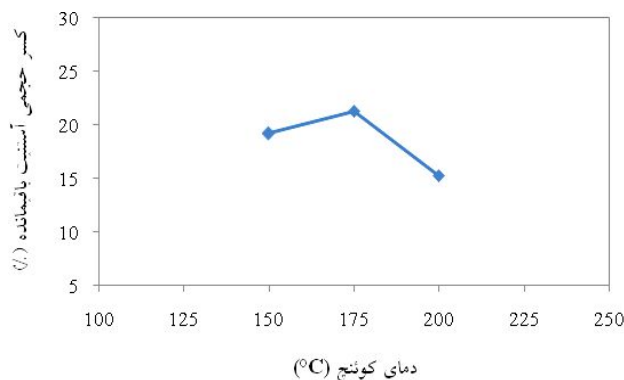
(۳۱۱) آستنیت، نسبت به سایر قله های پراش، کم است. با توجه به شدت قله ها در الگوهای پراش و با استفاده از رابطه ۲، کسر

دمای کوئنچ، مشابه روش‌شناسی<sup>۴</sup> انتخاب دمای کوئنچ بهینه برای بیشینه‌کردن نگهداری و پایداری سازی آستنیت پس از عملیات Q&P است [۱]. این شکل، دمای کوئنچ بهینه  $175^{\circ}\text{C}$  را برای ارائه مقدار بیشینه آستنیت باقی‌مانده نشان می‌دهد. در دماهای کوئنچ بالای دمای  $175^{\circ}\text{C}$ ، پس از کوئنچ اولیه، آستنیت تبدیل‌نشده قابل توجهی باقی می‌ماند، به طوری که در طول کوئنچ پایانی تا دمای اتاق به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در دماهای کوئنچ پایین دمای  $175^{\circ}\text{C}$ ، توسط کوئنچ اولیه، آستنیت بسیار زیادی تبدیل به مارتنزیت می‌شود. در واقع، در دمای کوئنچ  $175^{\circ}\text{C}$ ، از تشکیل مارتنزیت در طول کوئنچ پایانی جلوگیری شده است.

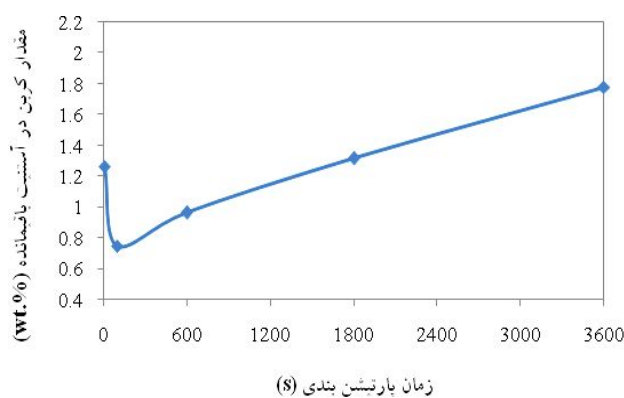
### ۳-۳- غلظت کربن آستنیت باقی‌مانده

برای تعیین غلظت کربن فاز آستنیت باقی‌مانده، از تحلیل XRD و رابطه ۳ استفاده شد. مقدار کربن این فاز برای هر نمونه با میانگین‌گیری از چهار قله (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) آستنیت گزارش شده است. جدول ۲ نشان‌دهنده کسر حجمی، مقدار کربن فاز آستنیت باقی‌مانده و حاصل ضرب این دو مقدار برای شرایط مختلف فرایند Q&P است.

شکل ۹، غلظت کربن آستنیت باقی‌مانده را پس از کوئنچ در  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰s و پارتیشن‌بندی در  $350^{\circ}\text{C}$  برای زمان‌های پارتیشن‌بندی متفاوت نشان می‌دهد. غلظت کربن در آستنیت از  $0.748\text{wt.}\%$  تا  $1.78\text{wt.}\%$  به این صورت تغییر می‌کند که با افزایش زمان پارتیشن‌بندی، ابتدا کاهش و سپس مرتب افزایش می‌یابد، که این نشان‌دهنده تخلیه و پارتیشن‌بندی بیش‌تر کربن از مارتنزیت به آستنیت است. ستون آخر جدول ۲ نشان می‌دهد که پس از پارتیشن‌بندی به مدت ۱۰s در دمای  $350^{\circ}\text{C}$ ،  $0.206\text{wt.}\%$  از مقدار کل کربن فولاد ( $0.639\text{wt.}\%$ )، در محلول جامد در آستنیت است. بقیه کربن، یا در مارتنزیت وجود دارد یا به شکل رسوب کاربید، مصرف شده است. غلظت کربن آستنیت باقی‌مانده پس از کوئنچ در  $175^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰s و پارتیشن‌بندی در سه دمای مختلف به مدت ۱۰s در شکل ۱۰



شکل ۸- تغییر کسر آستنیت باقی‌مانده به صورت تابعی از دمای کوئنچ



شکل ۹- تغییر غلظت کربن آستنیت باقی‌مانده به صورت تابعی از زمان پارتیشن‌بندی

کاهش کسر آستنیت باقی‌مانده وجود دارد. به عبارت دیگر، در طول عملیات پارتیشن‌بندی در دماهای بالا، آستنیت تبدیل‌نشده می‌تواند به کاربیدها، بینیت یا حتی پرلیت تجزیه شود و یا با حرکت فصل مشترک آستنیت / مارتنزیت باعث کاهش کسر آستنیت شود [۱۴]. در دمای پارتیشن‌بندی پایین نیز، اثر رسوب کاربید انتقالی، بیشینه آستنیت باقی‌مانده قابل دستیابی توسط عملیات Q&P را به گونه‌ای چشم‌گیر کاهش می‌دهد. در واقع بیشینه کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده، در زمان‌های کوتاه‌تر برای دماهای پارتیشن‌بندی بالاتر به دست آمده است، که در توافق با سینتیک مورد انتظار پارتیشن‌بندی کربن است.

شکل ۸، کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده را در دماهای کوئنچ  $150^{\circ}\text{C}$ ،  $175^{\circ}\text{C}$  و  $200^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، تغییر کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده با

جدول ۲- کسر حجمی و مقدار کربن آستنیت باقی مانده برای شرایط مختلف فرایند (QT و Qt)، دما و زمان کوئنچ و PT و Pt، دما و زمان پارتیشن بندی است)

نمونه	عملیات				کسر حجمی آستنیت باقی مانده	غلظت کربن آستنیت باقی مانده (wt.%)	کسر حجمی × غلظت کربن آستنیت باقی مانده
	QT (°C)	Qt (s)	PT (°C)	Pt (s)			
۱	۱۵۰	۲۰	۳۵۰	۱۰۰	۰/۱۹۲	۰/۵۵۴	۰/۱۰۶
۲	۱۷۵	۲۰	۳۵۰	۱۰۰	۰/۲۱۳	۰/۷۴۸	۰/۱۵۹
۳	۲۰۰	۲۰	۳۵۰	۱۰۰	۰/۱۵۳	۱/۰۵۱	۰/۱۶۱
۴	۱۷۵	۲۰	۳۰۰	۱۰۰	۰/۱۴۵	۰/۷۶۰	۰/۱۱۰
۵	۱۷۵	۲۰	۳۵۰	۱۰	۰/۱۶۳	۱/۲۶۴	۰/۲۰۶
۶	۱۷۵	۲۰	۳۵۰	۶۰۰	۰/۱۱۹	۰/۹۶۳	۰/۱۱۵
۷	۱۷۵	۲۰	۳۵۰	۱۸۰۰	۰/۱۱۷	۱/۳۱۵	۰/۱۵۴
۸	۱۷۵	۲۰	۳۵۰	۳۶۰۰	۰/۰۷۲	۱/۷۸۰	۰/۱۲۸
۹	۱۷۵	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۰/۲۱۸	۰/۸۹۹	۰/۱۹۶

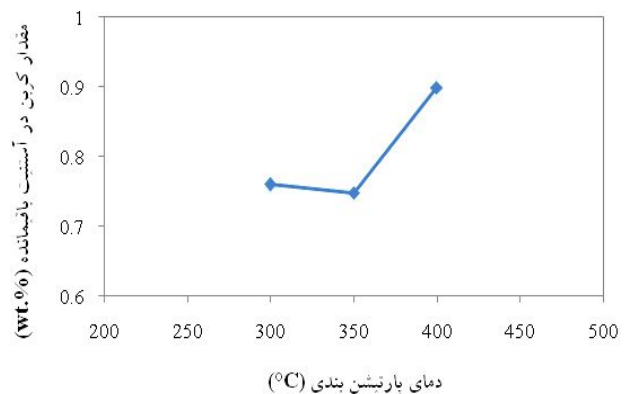
نشان داده شده است. همان طور که اشاره شد افزایش دمای پارتیشن بندی، باعث افزایش سرعت نفوذ کربن از مارتزیت به آستنیت و افزایش کربن در آستنیت می شود، به طوری که غلظت کربن آستنیت باقی مانده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به بیشترین مقدار (۰/۸۹۹wt.%) می رسد. با توجه به جدول ۲، مقدار کربن آستنیت در این دما ۰/۱۹۶wt.% مقدار کل کربن است.

شکل ۱۱، غلظت کربن آستنیت باقی مانده را در دماهای کوئنچ  $150^{\circ}\text{C}$ ،  $175^{\circ}\text{C}$  و  $200^{\circ}\text{C}$  نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش دمای کوئنچ، غلظت کربن آستنیت باقی مانده از ۰/۵۵۴wt.% تا ۱/۰۵۱wt.% به شدت افزایش می یابد و در دمای کوئنچ  $200^{\circ}\text{C}$ ، ۰/۱۶۱wt.% از مقدار کل کربن فولاد، در محلول جامد در آستنیت است.

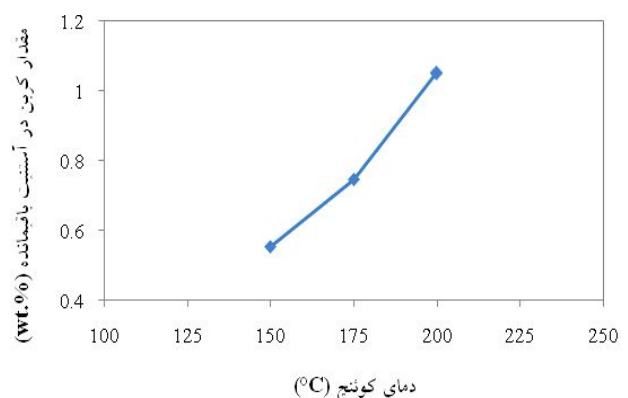
#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای فرایند Q&P روی ریزساختار، کسر حجمی و غلظت کربن آستنیت باقی مانده بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- افزایش زمان پارتیشن بندی، باعث ظریف شدن و از بین رفتن تیغه های مارتزیت و تبدیل ساختار به شکل مارتزیت



شکل ۱۰- تغییر غلظت کربن آستنیت باقی مانده به صورت تابعی از دمای پارتیشن بندی



شکل ۱۱- تغییر غلظت کربن آستنیت باقی مانده به صورت تابعی از دمای کوئنچ



- آستنیت و افزایش غلظت کربن آستنیت، افزایش می‌یابد.
- تغییر کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده با دمای کوئنچ، مشابه روش‌شناسی انتخاب دمای کوئنچ بهینه است و با افزایش دمای کوئنچ، غلظت کربن آستنیت به شدت افزایش می‌یابد.
- با افزایش زمان پارتیشن‌بندی، غلظت کربن در آستنیت ابتدا کاهش و سپس مرتب افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تخلیه و پارتیشن‌بندی بیش‌تر است.

- تمپر شده می‌شود و افزایش دمای پارتیشن‌بندی باعث رشد لایه‌های آستنیت باقی‌مانده می‌شود.
- کسر آستنیت پس از پارتیشن‌بندی در مدت زمان کوتاه به یک مقدار بیشینه می‌رسد و سپس به دلیل فرایندهای رقابتی، کاهش می‌یابد.
- با افزایش دمای پارتیشن‌بندی، کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده، به دلیل افزایش سرعت نفوذ کربن از مارتنزیت به

## واژه‌نامه

- |          |                |
|----------|----------------|
| 1. Speer | 3. Santofimia  |
| 2. Cohen | 4. methodology |

## مراجع

1. Edmonds, D.V., He, K., Rizzo, F.C., De Cooman, B.C., Matlock D.K. and Speer, J.G., "Quenching and Partitioning Martensite- A Novel Steel Heat Treatment", *Materials Science and Engineering A*, Vols. 438-440, pp. 25-34, 2006.
2. Li, H.Y., Lu, X.W., Wu, X.C., Min Y.A. and 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*, Vol. 527, pp. 6255-6259, 2010.
3. Jirková, H., Ku erová, L. and Mašek, B., "Effect of Quenching and Partitioning Temperatures in the Q-P Process on the Properties of AHSS with Various Amounts of Manganese and Silicon", *Materials Science Forum*, Vols. 706-709, pp. 2734-2739, 2012.
4. Liu, H., Jin, X., Dong, H. and Shi, J., "Martensitic Microstructural Transformations from the Hot Stamping, Quenching and Partitioning Process", *Materials Characterization*, Vol. 62, pp. 223-227, 2011.
5. Santofimia, M.J., Zhao, L., Petrov, R., Kwakernaak, C., Sloof, W.G. and Sietsma, J., "Microstructural Development during the Quenching and Partitioning Process in a Newly Designed Low-Carbon Steel", *Acta Materialia*, Vol. 59, pp. 6059-6068, 2011.
6. Yang, L., Yu-peng, L., Chong, W., Shi-tong, L. and Lu-bin, C., "Phase Stability of Residual Austenite in 60Si2Mn Steels Treated by Quenching and Partitioning", *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 18, No. 2, pp. 70-74, 2011.
7. Clarke, A.J., Speer, J.G., Matlock, D.K., Rizzo, F.C., Edmonds, D.V. and Santofimia, M.J., "Influence of Carbon Partitioning Kinetics on Final Austenite Fraction during Quenching and Partitioning", *Scripta Materialia*, Vol. 61, pp. 149-152, 2009.
8. Santofimia, M.J., Zhao, L., Petrov, R. and Sietsma, J., "Characterization of the Microstructure Obtained by the Quenching and Partitioning Process in a Low-Carbon Steel", *Materials Characterization*, Vol. 59, pp. 1758-1764, 2008.
9. Nayak, S.S., Anumolu, R., Misra, R.D.K., Kim, K.H. and Lee, D.L., "Microstructure-Hardness Relationship in Quenched and Partitioned Medium-Carbon and High-Carbon Steels Containing Silicon", *Materials Science and Engineering A*, pp. 442-456, 2008.
10. Jatzak, C.F., Larson, J.A. and Shin, S.W., *Retained Austenite and Its Measurement by X-Ray Diffraction*, Manual SP-452, SAE, 1979.
11. Cullity, B.D., *Elements of X-ray Diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, Massachusetts, 1956.
12. Santofimia, M.J., Zhao, L. and Sietsma, J., "Microstructural Evolution of a Low-Carbon Steel during Application of Quenching and Partitioning Heat Treatments after Partial Austenitization", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40A, pp. 46-57, 2009.
13. Wang, C.Y., Zhang, Y.J., Cao, W.Q., Shi, J., Wang, M.Q. and Dong, H., "Austenite/Martensite Structure and Corresponding Ultrahigh Strength and High Ductility of Steels Processed by Q&P Techniques", *Science China, Technological Sciences*, Vol. 55, No. 7, pp. 1844-1851, 2012.
14. De Moor, E., Lacroix, S., Clarke, A.J., Penning, J. and Speer, J.G., "Effect of Retained Austenite Stabilized via Quench and Partitioning on the Strain Hardening of Martensitic Steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39A, pp. 2586-2595, 2008.

