

## ارزیابی غیرمخرب گلوله‌های آسیا چدن پر کروم توسط آزمون جریان گردابی

مجتبی جواهری<sup>۱</sup>، مجید عباسی<sup>۲\*</sup>، نیما عزیزی<sup>۲</sup>، سید محمد علی بوترابی<sup>۴</sup>

۱. کارشناسی ارشد مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۲. دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۳. کارشناسی ارشد مواد، دانشگاه صنایع و معادن ایران.

۴. استاد دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد.

\* abbasim@nit.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق از آزمون غیرمخرب جریان گردابی برای ارزیابی میزان آستنیت باقیمانده در ریزساختار و سختی گلوله‌های آسیا از جنس چدن پر کروم استفاده شد. به این منظور نمونه‌هایی از گلوله چدن آلیاژی با ترکیب اسمی ۳۰ درصد وزنی کروم و ۳ درصد وزنی کربن و با قطر ۴۰ میلی‌متر پس از ریخته‌گری در ماسه انتخاب شدند. برای دستیابی به سختی و میزان آستنیت باقیمانده متفاوت، گلوله‌ها تحت سیکل‌های متفاوت حرارتی شامل دماهای مختلف آستنیت‌زایی و برگشت قرار گرفتند. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی، XRD و سختی‌سنجی به روش ویکرز انجام شد. در ادامه با استفاده از یک دستگاه جریان گردابی، ریزساختار گلوله‌ها در فرکانس‌های مختلف ۵۰ تا 200 kHz مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با استفاده از روش جریان گردابی می‌توان ریزساختارهای مختلف گلوله‌ها با مقادیر متفاوت از آستنیت باقیمانده و سختی را به صورت غیرمخرب و سریع، شناسایی و تفکیک کرد. به این منظور، بازرسی جریان گردابی در فرکانس 150 kHz با استفاده از شاخص امپدانس به عنوان روش ارزیابی غیرمخرب انتخاب شده است. این شاخص با افزایش میزان آستنیت باقیمانده، کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** ارزیابی غیرمخرب، جریان گردابی، چدن پر کروم، گلوله‌های آسیا، آستنیت باقیمانده.

### ۱- مقدمه

معمولاً در آسیا، گلوله‌ها از جنس چدن پر کروم انتخاب می‌شوند، که وجود کاربید سخت در زمینه مارتنزیتی با مقدار کمی آستنیت باقیمانده می‌تواند بهترین مقاومت به سایش را برای شرایط کاری این نوع گلوله‌ها مهیا کند [۱، ۲]. ساختار اولیه آلیاژهای ریخته‌گری چدن پر کروم شامل شبکه دندریت‌های آستنیت است. هنگامی که درصد کروم بیش از ۱۱٪ و نسبت کروم به کربن بزرگتر از ۳/۵ باشد، کاربید M7C3 می‌تواند جایگزین کاربید M3C شود. این مورفولوژی اولیه می‌تواند تحت استحاله‌های با اهمیت از طریق عملیات حرارتی‌های متفاوت تغییر کند و به شکل مخلوطی از مارتنزیت/آستنیت با کاربیدهای ثانویه رسوبی به همراه دندریت‌های آستنیت اولیه تغییر پیدا کند که حداکثر سختی و مقاومت به سایش را در این سیستم نتیجه می‌دهد. لزوم استفاده از گلوله‌ها در آسیاب‌های بزرگ مدرن، هر چه بیشتر از آن را به ویژه در شرایط ضربه‌های

مکرر، مطرح کرده است، که این شرایط از طریق تنظیم صحیح میزان کربن و سپس عملیات حرارتی مناسب آلیاژ عملی است که آستنیت باقیمانده را تقریباً از بین می‌برد. بنابراین کنترل میزان آستنیت باقیمانده پارامتری بسیار مهم و کلیدی در آن است [۳، ۴].

امروزه برای بالا بردن اطمینان از کنترل کیفیت تمامی قطعات در خط تولید، از آزمون‌های غیرمخرب در صنعت استفاده می‌کنند. با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب می‌توان عیوب موجود در قطعات از قبیل تخلخل و حفره‌های داخلی، ترک و ناپیوستگی‌های سطحی و داخلی، ناخالصی‌ها و انواع عیوبی که در حین فرآیند تولید و یا در حین کار تحت شرایط ویژه محیط کار ایجاد و شکل می‌گیرند را شناسایی نمود [۵، ۶].

آزمون جریان گردابی یا ادی کارنت یکی از آزمون‌های بسیار پرکاربرد در زمینه بازرسی و ارزیابی قطعات تولید شده می‌باشد. در آزمون جریان گردابی، رسانایی الکتریکی ماده به عنوان متغیر اصلی است. رسانایی در اثر عوامل متعددی تغییر می‌کند. این عوامل می‌تواند تغییر در

متالوگرافی، XRD، سختی سنجی با پاسخ آزمون غیرمخرب جریان گردابی.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- بررسی‌های مخرب

در این تحقیق از هفت عدد گلوله آسیا از جنس چدن پرکروم با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ و شکل ۱ و با قطر mm40 انتخاب شد. شش عدد از این گلوله‌ها مطابق جدول ۲ آستنیته و تمپر شده و سپس در دمای محیط به آرامی سرد شدند. بعد از انجام عملیات حرارتی، تمامی نمونه‌ها سنگ زده شده و از تمامی آنها آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E9، تحت نیروی 30kg و زمان ۱۰ ثانیه و با حداقل سه بار تکرار با حداقل به عمل آمد. در ادامه، نمونه‌ها سنباده و پولیش شده و برای بررسی ریزساختار با محلول ویلا اچ شدند و ریزساختار آنها توسط میکروسکوپ نوری ارزیابی شد. برای بررسی مقدار آستنیت باقیمانده و مارتنزیت موجود در ریزساختار از روش تفرق اشعه X توسط دستگاه XRD، مدل Brucker D-8، با تابش  $\text{Cu K}\alpha$  تحت زاویه  $2\theta$  با ولتاژ 20KV و طول موج  $\lambda=1.5418\text{\AA}$  استفاده شد، که روی صفحات (۱۱۱) آستنیت، (۱۰۰) مارتنزیت و (۲۱۱) کاربید یوتکتیک بررسی شدند، درصد حجمی فازها پس از عملیات حرارتی براساس شدت پیک‌های به دست آمده از الگوی پراش اشعه X توسط نرم افزار X-Pert محاسبه شد. در روش تفرق اشعه X، میزان فاز آستنیت باقی‌مانده مطابق استاندارد ASTM E975-84 تعیین شد.



شکل (۱) گلوله‌های آسیا از جنس چدن پر کروم (قطر ۴۰ میلی‌متر).

ترکیب شیمیایی، تغییر در شبکه کریستالی و ریزساختار، تغییر دما وجود ناهمگنی مثل ترک و یا شکاف و تغییر ابعاد باشد. آزمون جریان گردابی در مقایسه با روش‌های دیگر غیرمخرب نظیر فراصوت و اشعه ایکس نسبتاً ارزان بوده و همچنین زمان دستیابی به نتایج در این روش بسیار سریع است. با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ، در داخل و اطراف سیم‌پیچ یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که موسوم به میدان مغناطیسی اولیه است. با نزدیک شدن سیم‌پیچ به سطح یک ماده رسانا، میدان مغناطیسی سیم‌پیچ منجر به ایجاد جریان‌هایی در داخل ماده می‌شود که جریان‌های گردابی نامیده می‌شود. جریان‌های گردابی تشکیل شده در ماده باعث تشکیل یک میدان ثانویه در قطعه می‌شود. براساس قانون لنز، جهت جریان القایی به گونه‌ای است که میدان ناشی از آن با میدان ناشی از جریانی که آن را ایجاد کرده، مخالفت می‌کند. حضور عیب یا ترک و یا تغییرات ریزساختاری یا ترکیب شیمیایی موجب می‌شود که حرکت جریان گردابی دچار اختلال و یا تغییرات شود. این تغییرات بر روی میدان ثانویه تاثیر گذاشته و در ادامه منجر به اختلاف میان میدان ثانویه و اولیه می‌شود. با ارزیابی برهمکنش این میدان‌ها و کالیبره کردن سیگنال‌های دریافتی از نمونه‌های شاهد، می‌توان نوع و شدت اثر عامل تغییر میدان را ارزیابی کرد [۷-۹].

عباسی و همکاران [۱۰] اثر جریان گردابی بر قطعات استکان تاپیت خودرو که به روش کربونیتروره سخت کاری سطحی شده بودن را ارزیابی نموده و توانستند قطعات با عمق لایه سخت شده و میزان سختی متفاوت را از یکدیگر تفکیک کنند. کامرینی و همکاران [۱۱] مشخصات ریزساختاری یک فولاد زنگ‌نزن دوفازی را توسط آزمون جریان گردابی ارزیابی کردند. کاشفی و همکاران [۱۲] اثر ریزساختارهای مختلف چدن را با آزمون جریان گردابی بررسی کردند. کونوپلایک و خان [۱۳، ۱۴] درصد پرلیت را در چدن با گرافیت کروی و فولاد ساده کربنی تعیین کردند.

هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی و امکان سنجی تغییرات درصد آستنیت باقیمانده در گلوله‌های آسیا، با انجام سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج آزمون‌های مخرب نظیر

جدول (۱) ترکیب شیمیایی گلوله‌های چدنی پرکروم (درصد وزنی).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
۲/۷۸	۰/۸	۰/۳۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۲۹/۲	۰/۱۲	۰/۴۱	۰/۱۵	بقیه

جدول (۲) سیکل‌های عملیات حرارتی اعمالی بر روی گلوله‌ها.

شرایط تمپیر		شرایط آستنیت‌ه		کد نمونه‌ها
زمان (min)	دما (°C)	زمان (min)	دما (°C)	
۱۲۰	۲۳۰	۱۰۰	۹۰۰	۱
		۱۸۰		۲
		۱۰۰	۹۵۰	۳
		۱۸۰		۴
		۱۰۰	۱۰۰۰	۵
		۱۸۰		۶

در شکل ۳ (ب) تا (د)، تصاویر از ریزساختار گلوله‌های عملیات حرارتی شده را نشان داده شده است. پس از انجام عملیات حرارتی زمینه آستنیت به مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه تبدیل شده و همچنان مقدار کمی آستنیت باقیمانده حضور خواهد داشت. در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰ C نمونه دارای دندریته‌های آستنیت اولیه بوده که به مارتنزیت تبدیل شدند و کاربیدهای یوتکتیک M7C3 بدون تغییر به همراه کاربیدهای ثانویه دیده شده است. عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ C کاربیدهای ثانویه را ریزتر و یکنواخت‌تر کرده است. با افزایش درجه حرارت کاربیدهای بیشتری در آستنیت حل شده و دمای تشکیل مارتنزیت کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان آستنیت باقیمانده افزایش می‌یابد. افزایش دمای آستنیت از طرفی باعث افزایش انحلال کروم و کربن در زمینه می‌شود و از طرفی به خاطر بالا رفتن دمای Ms میزان آستنیت باقیمانده بالا می‌رود، با حرارت دادن آلیاژ در دماهای بالا، کاربیدهای ثانویه از نوع M23C6 در زمینه رسوب کرده و آستنیت را از کربن و عناصر آلیاژی فقیر می‌کند. بنابراین ریزساختار نمونه‌های عملیات حرارتی شده شامل کاربیدهای یوتکتیک و زمینه حاوی آستنیت باقیمانده، مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه است. عملیات حرارتی تأثیری بر روی کاربید یوتکتیک ندارد ولی می‌تواند توزیع و اندازه کاربیدهای ثانویه را تغییر دهد [۱، ۲].

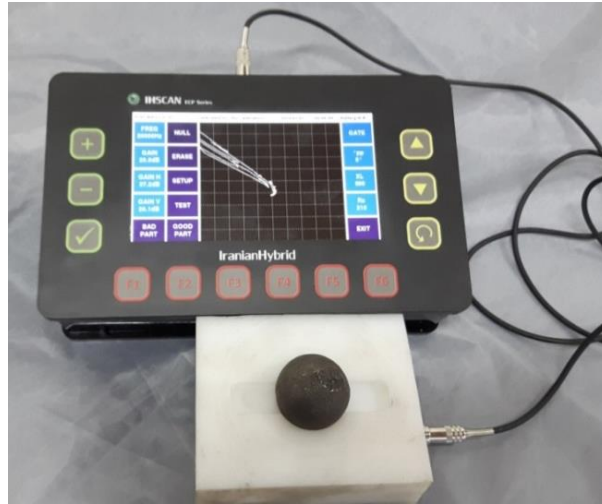
## ۲-۲- بررسی غیرمخرب

در این تحقیق از یک دستگاه جریان گردابی مطابق شکل ۲ ساخت شرکت ایرانیان هیبرید که قابلیت به کارگیری در محدوده فرکانس ۱۰۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز را دارد، با پراب ساده هسته‌دار استفاده شد. از امپدانس (Z) و مقاومت القایی (XL)، به عنوان پاسخ جریان گردابی برای ارزیابی و تحلیل ریزساختار و سختی استفاده شد. در این تحقیق اثر فرکانس در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز مورد ارزیابی قرار گرفت. برای کالیبراسیون دستگاه، یک نمونه به عنوان نمونه شاهد انتخاب می‌شود. در این تحقیق از نمونه ریختگی (کد نمونه ۷) به عنوان نمونه شاهد مرکزی انتخاب شده است.

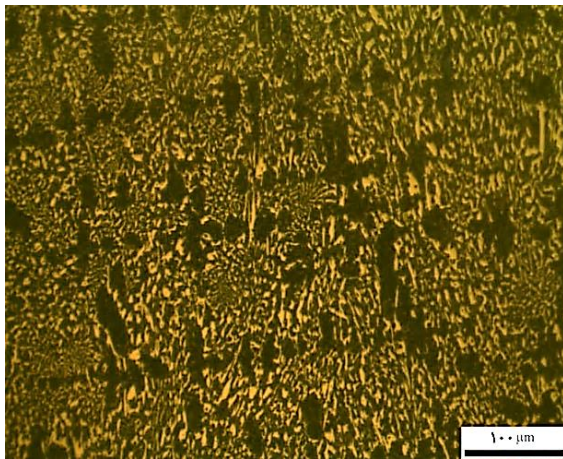
## ۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی‌های مخرب ریزساختار و سختی شکل ۳ (الف)، تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ریختگی گلوله چدن پرکروم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ریزساختار گلوله‌های چدن پرکروم در حالت ریختگی به صورت دندریته‌های اولیه آستنیتی همراه با سل‌های یوتکتیکی آستنیت (پیکان سفید) و کاربیدهای M7C3 (سفید) است، که در حین سرد شدن برخی از آستنیت به مارتنزیت (فاز سیاه رنگ) تبدیل می‌شود.

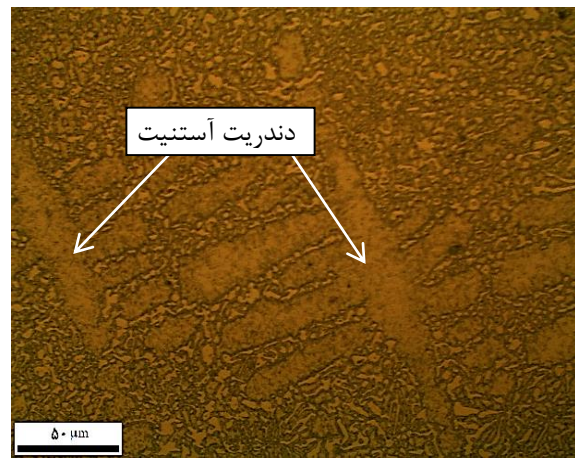




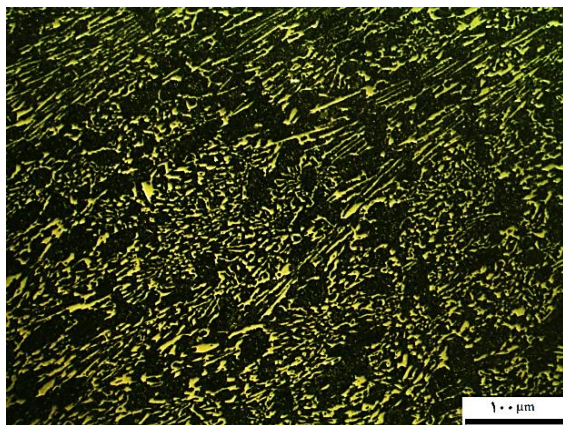
شکل (۲) دستگاه جریان گردابی به همراه پراب و فیکسچر مورد استفاده در آزمایش.



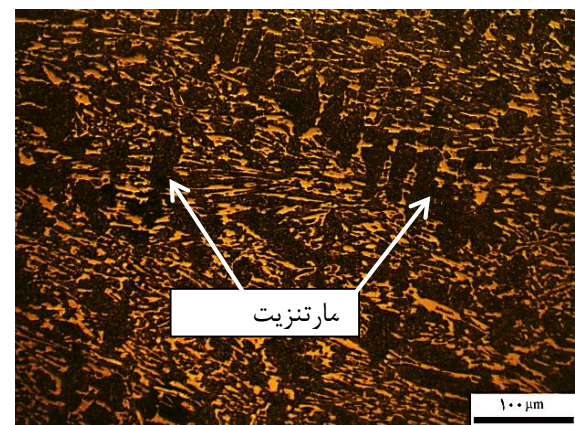
ب



الف



د



ج

شکل (۳) (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه ریختگی، (ب) شرایط ۲، (ج) شرایط ۴، (د) شرایط ۵، (ه) شرایط ۶.

است. فازهای موجود در ریزساختار ریختگی چدن پرکروم شامل آستنیت، مارتنزیت و کاربیدهای یوتکتیک M7C3 است. نتایج نشان داد که پس از عملیات حرارتی فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده، مقدار پیک مربوط به

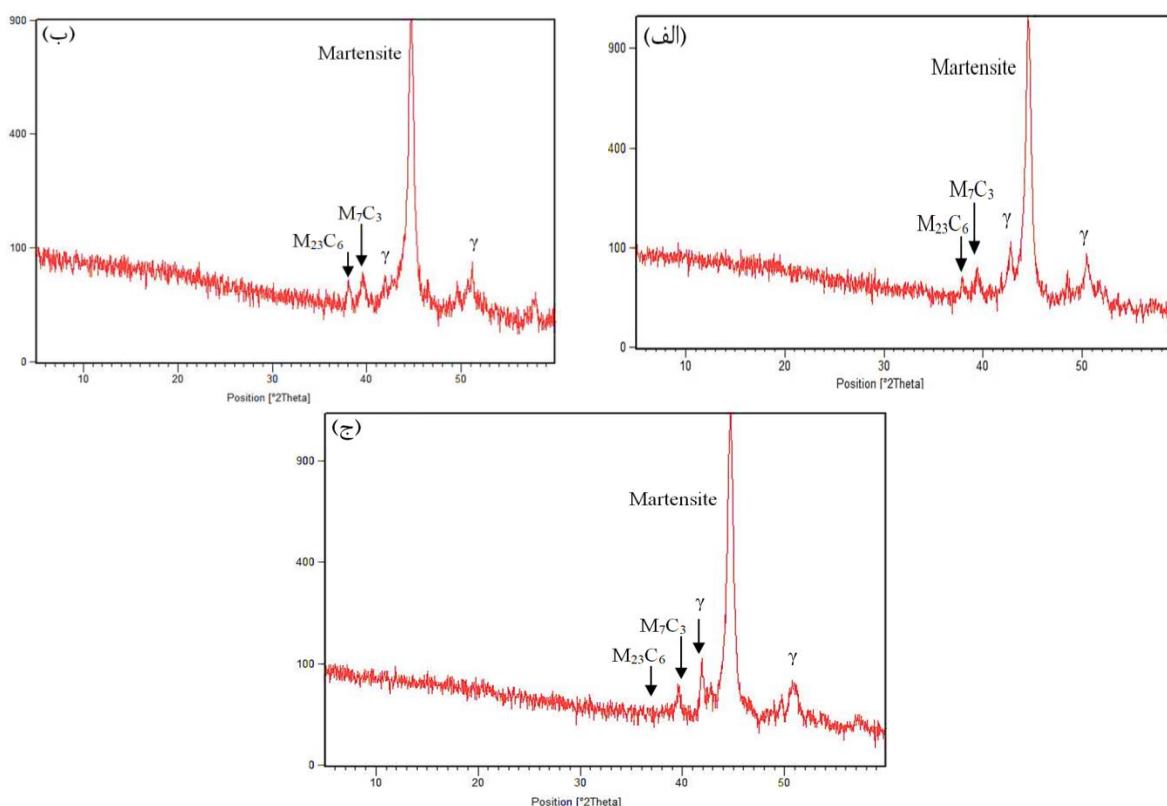
نتایج الگوی تفرق اشعه ایکس در شکل ۴، برای نمونه‌های عملیات حرارتی ارائه شده است. فازهای موجود در ریزساختار شامل مارتنزیت، کاربیدهای یوتکتیک M7C3، کاربید ثانویه M23C6 و آستنیت باقیمانده (۲)

سختی افزایش می‌یابد. در دماهای بالا آستنیت پرکربن بوده و کربن بیشتری در زمینه حل می‌شود. چون دمای شرایط آستنیت بالا است و نمونه از دمای بالا سرد می‌شود، درصد آستنیت باقیمانده افزایش یافته و مارتنزیت پرکربن حاصل می‌شود. از طرف دیگر دمای پایین آستنیت نیز سبب تشکیل مارتنزیت کم کربن شده و در نتیجه سختی را کاهش می‌دهد [۱۵].

فاز آستنیت کاهش یافت و پیک مربوط به فاز مارتنزیت افزایش یافته است. شدت پیک آستنیت باقیمانده برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$ ، نشان دهنده میزان کمتر آستنیت باقیمانده در زمینه است و با افزایش دما شدت پیک افزایش یافته که نشان می‌دهد آستنیت باقیمانده در دماهای بالاتر بیشتر شده است. در جدول ۳، نتایج سختی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آستنیت، میزان

جدول (۳) سختی گلوله‌ها بعد از عملیات حرارتی.

سختی (HV)	سیکل عملیات حرارتی	کد نمونه
۸۵۰	آستنیت در دمای $900^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۰۰ دقیقه	۱
۸۷۰	آستنیت در دمای $900^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۸۰ دقیقه	۲
۸۸۵	آستنیت در دمای $950^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۰۰ دقیقه	۳
۹۲۰	آستنیت در دمای $950^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۸۰ دقیقه	۴
۹۳۰	آستنیت در دمای $1000^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۰۰ دقیقه	۵
۹۵۰	آستنیت در دمای $1000^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۸۰ دقیقه	۶
۶۵۰	ریختگی	۷



شکل (۴) نتایج به دست آمده از آزمون XRD. الف) شرایط ۱، ب) شرایط ۲ و ج) شرایط ۳.

$\delta$  عمق نفوذ استاندارد است که برابر با ۳۷٪ مقدار میدان مغناطیسی ایجاد شده در سطح است. با توجه به رابطه (۱) با افزایش فرکانس، عمق نفوذ استاندارد جریان‌های گردابی کاهش می‌یابد که نشان دهنده افت نفوذپذیری مغناطیسی ماده است [۱۶]. شکل ۶، صفحه امپدانس بر حسب شاخص Rx (مقاومت اهمی) و XL (مقاومت القایی) رسم شد که در آن موقعیت شاخص جریان گردابی (امپدانس، Z) هر یک از نمونه‌ها در فرکانس 150 kHz مشخص شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌ها موقعیت‌های مختلفی در صفحه امپدانس (صفحه نمایشگر دستگاه جریان گردابی یا صفحه اسیلوسکوپ) دارند که بیشترین تفاوت آنها در

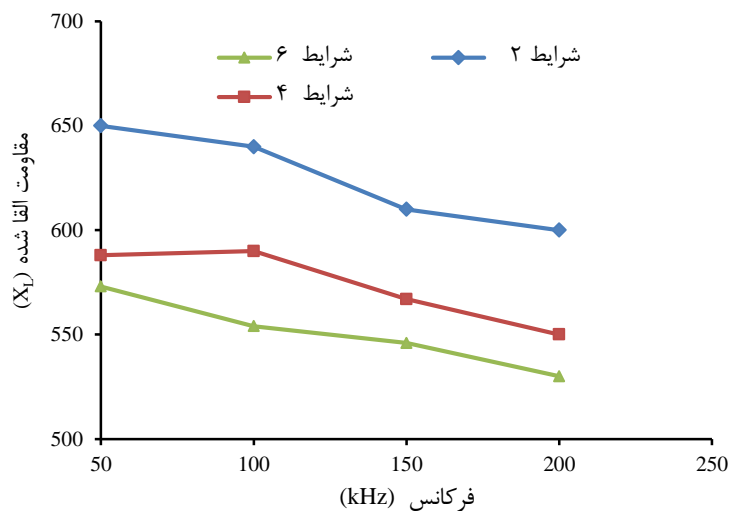
### ۳-۲- ارزیابی غیرمخرب ریزساختار و سختی

در شکل ۵، اثر فرکانس در محدوده 50 kHz تا ۲۰۰ بر روی مقاومت القایی برای سه شرایط (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است. طبق بررسی‌های انجام گرفته مشاهده شد که بهترین تفکیک ریزساختاری در فرکانس 150 kHz صورت پذیرفته است. در نتیجه این فرکانس به عنوان فرکانس کاری تعیین شد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه با افزایش فرکانس، مقاومت القاء شده کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ریاضی (۱)، (۲) و (۳):

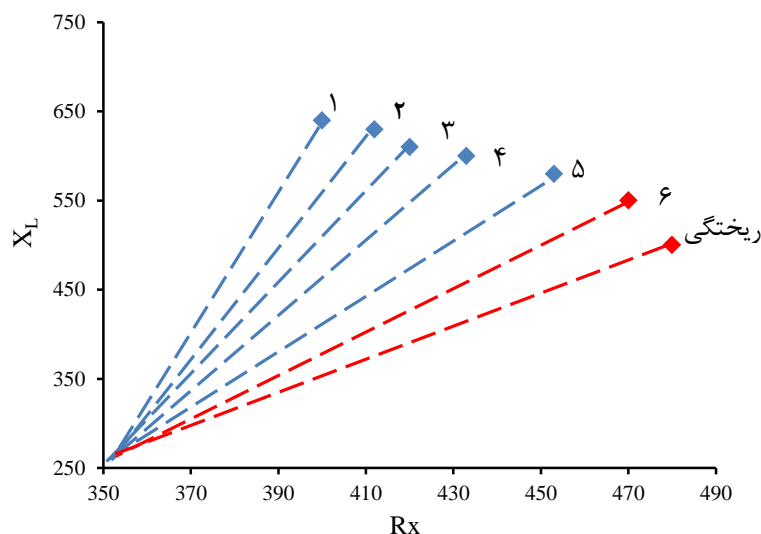
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

$$X_L = 2\pi f L \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{(R_x^2 + X_L^2)} = \frac{V}{I} \quad (3)$$



شکل (۵) اثر فرکانس بر مقاومت القایی.

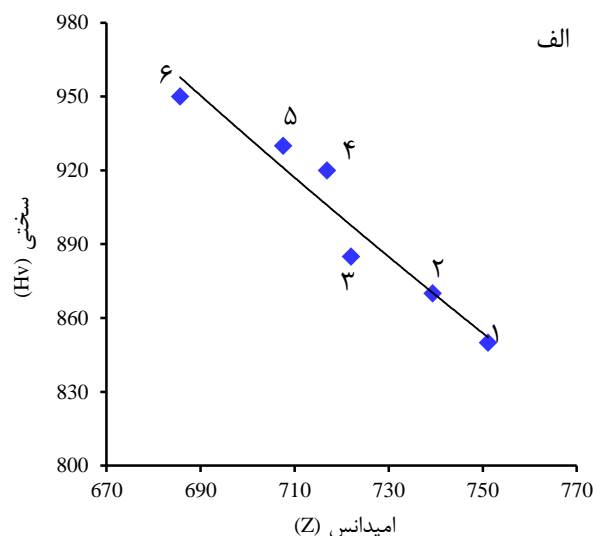
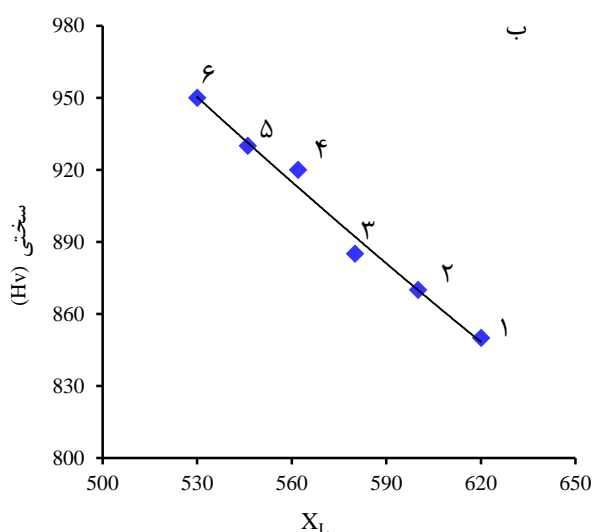


شکل (۶) تاثیر ریزساختار نمونه‌ها بر روی نحوه قرارگرفتن نقاط در صفحه امپدانس.

داشته باشد. افزایش دمای آستنیت از طرفی باعث افزایش انحلال کروم و کربن در زمینه می‌شود و از طرفی به خاطر بالا رفتن دمای Ms میزان آستنیت باقیمانده بالا می‌رود. با حرارت دادن آلیاژ در دماهای بالا کاربیدهای ثانویه از نوع M<sub>2</sub>3C<sub>6</sub> در زمینه رسوب کرده که تاثیر عوامل بیان شده بر روی خواص مغناطیسی ماده بسیار مورد توجه است، زیرا کاربیدها و آستنیت باقیمانده به عنوان مانعی در برابر جریان‌های مغناطیس عمل کرده و موجب قفل شدن حوزه‌های مغناطیسی می‌شود و به بیان دیگر آنها باعث کند شدن حرکت حوزه‌های مغناطیسی در ماده شده و ماده به سختی اشباع مغناطیسی می‌شود. همچنین افزایش پارامتر تراگونالیت، عیوب خطی شبکه (از قبیل نابجایی‌ها، مرزهای فرعی و غیره)، در این امر تاثیر بسزایی دارند. حضور چگالی بالایی از نابجایی‌ها، موجب تشکیل شبکه‌ای از نابجایی‌های در هم تنیده می‌شود و همچنین در کنار آنها دوقلوبی‌های سطحی نیز شکل می‌گیرند. حضور این عوامل موجب تشدید تنش‌های داخلی و تنش‌های چند بعدی در داخل شبکه می‌شود [۱۷، ۱۸]. اما در دماهای کمتر، امکان تشکیل کاربیدهای ثانویه از آستنیت غنی از کربن و کروم بیشتر فراهم می‌شود و با کاهش غلظت کربن محلول در آستنیت، شرایط تشکیل مارتنزیت بیشتر فراهم می‌شود. از این رو مقدار آستنیت باقیمانده در ریزساختار نهایی کاهش می‌یابد.

راستای محور عرضی (محور x یا همان شاخص Rx) است. با تنظیمات انجام شده در نحوه نمایش، به خوبی می‌توان گلوله‌ها را با توجه به موقعیت در صفحه نمایش پیش‌بینی کرد. موقعیت‌های سمت راست دارای آستنیت باقیمانده بیشتری نسبت به موقعیت‌های سمت چپ هستند و بر عکس نمونه ریختگی در قسمت راست نمودار قرار دارد و دارای بیشترین میزان آستنیت باقیمانده است. با افزایش دمای آستنیت، درصد آستنیت باقیمانده بیشتر شده و پاسخ آزمون جریان گردابی به سمت نمونه ریختگی حرکت می‌کند. به این ترتیب با استفاده از سامانه جریان گردابی طراحی شده به صورت گرافیکی از روی صفحه نمایش‌گر، می‌توان قطعات را بر اساس سختی و ریزساختار تفکیک کرد.

در شکل ۷، شاخص‌های مهم جریان گردابی نظیر XL و Z، برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ ارتباط میان درصد آستنیت باقیمانده مطابق با نتایج XRD با سختی و شاخص امپدانس برای سه نمونه ۲، ۴ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در رابطه (۲) و (۳) نشان داده شد، به ترتیب امپدانس و مقاومت القایی تابع نفوذپذیری مغناطیسی ماده است. آستنیت باقیمانده یک فاز پارامغناطیسی (□□□۱) است و حضور کاربیدهای حل نشده به همراه آستنیت باقیمانده موجب می‌شود که نمونه رفتاری شبیه به ماده غیرمغناطیس و غیرفلزی



شکل (۷) ارتباط میان شاخص‌های جریان گردابی با سختی در شرایط مختلف حرارتی الف: شاخص Z ب: XL.



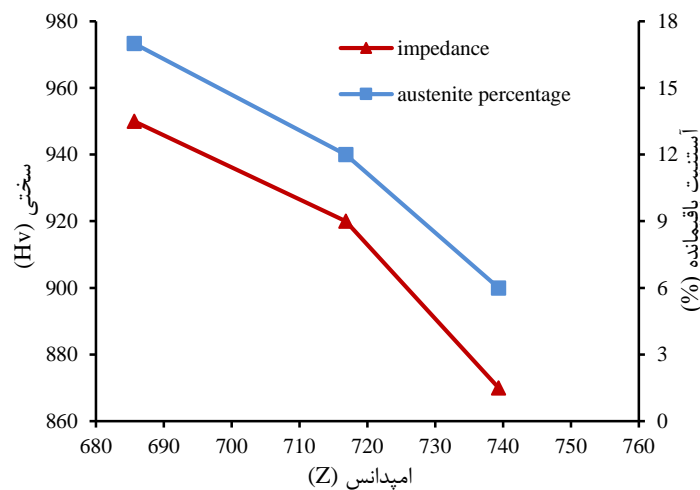
طراحی انجام شده و مجموع نتایج آزمون‌های مخرب و غیرمخرب مشاهده شد که می‌توان از روش جریان گردابی برای کنترل و تضمین کیفیت صد در صد میزان آستنیت باقیمانده در نمونه‌ها استفاده نمود.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل گهر سیرجان و شرکت ایرانیان هیبرید شمال (مستقر در مرکز رشد فناوری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل) صمیمانه تقدیر می‌کنند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با آزمون غیرمخرب جریان گردابی چگونگی تفکیک و ارزیابی گلوله‌های آسیا از جنس چدن پر کروم با میزان آستنیت باقیمانده و ریزساختار متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین آزمون‌های مخرب نظیر متالوگرافی، XRD، سختی‌سنجی برای تایید نتایج آزمون غیرمخرب جریان گردابی بکار گرفته شد. نتایج جریان گردابی نشان داد که شاخص امپدانس و مقاومت القایی به عنوان پاسخ جریان گردابی با افزایش میزان آستنیت باقیمانده، کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس



شکل (۸) ارتباط میان میزان آستنیت باقیمانده و جریان گردابی (امپدانس) برای سه نمونه ۴.۲ و ۶.

[6] International Atomic Energy Agency. (2011) Eddy Current Testing at Level 2, Vienna International Centre, Austria, pp. 89-100.

[۷] خودسیانی، رضا؛ (۱۳۸۲) آزمون‌های غیرمخرب، شرکت ملی گاز ایران، ص. ۵۲۱-۵۳۰.

[8] ASM Committee, (1989) ASM Handbook (Nondestructive Evaluation and Quality Control Vol 17), 9th ed, ASM International.

[۹] جواهری، م.؛ عباسی، م.؛ شامقلی، م.؛ ریاضی، س. م.؛ (۱۳۹۴) کنترل کیفیت غیرمخرب قطعات کربونیتورده شده با آزمون جریان گردابی: مطالعه موردی ارزیابی سختی قطعه پیستونی روی فنر سوپاپ. سومین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران، تهران، هتل المپیک.

[10] Camerini, C., Sacramento, R., Areiza, M. C., Rocha, A., Santos, R., Rebello, J. M., Pereira, G., (2015) Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization. J. Magnetism. Magnetic. Mater, 388, pp. 96-100.

[11] Kashefi M., Kahrobaee, S., (2013) Determination of Presence of Undesirable Carbides at Surface of Cast Iron Parts Using

#### ۵- منابع

[1] Tabrett, C. P., Sare, I. R., (1997). The Effect of Heat Treatment on the Abrasion Resistance of Alloy White Irons. Wear, 203-204, pp. 206-219.

[2] Fusheng, H., Shouguo, S., (2002). Study on the Structure and Properties of a Novel Mini-Sized High Cr Mill Balls. Wear, 253, pp. 640-649.

Turnee, F., Lavalli, J., Masounave., (1989). Matrix Microstructure Effect on the Abrasion Wear Resistance of High-Chromium White Cast Iron. J. Mater. Sci., 24, pp. 3021-3028.

[3] Dogan, O. N., Hawk, J. A., Larid, G., (1997) Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons. Metall. Mater. Trans. A., 28, pp. 1315-1328.

[4] J. Shull, P.; (2002) Nondestructive Evaluation Theory, Techniques and Applications, 2ed ed, Marcel Dekker, New York, pp. 261-280.

[5] Hellier, C. J., (2003). Handbook of nondestructive evaluation, 2ed ed McGraw-Hill Companies, New York, pp. 417-430.



- غیرمخرب جریان گردابی. پژوهش‌نامه ریخته‌گری، دوره ۱، شماره ۳، ص. ۱۴۹-۱۶۰
- [16] Bida, G. V., Nichipuruk, A. P., Tsarkova, T.P., (2001) Magnetic Properties of Steels After Quenching and Tempering I General Carbon Steels. Russ. J. Nondest. Test., 29 37, 3-25.
- [۱۷] جواهری، م؛ عباسی، م؛ ریاضی، س. م؛ عشقیان، ر؛ (۱۳۹۳) اثر دمای تمپر بر پاسخ آزمون غیرمخرب جریان گردابی. سومین کنفرانس بین المللی مواد مهندسی و متالورژی، تهران، دانشگاه شهید بهشتی
- Differential Eddy Current Technique. Mater. Sci. Tech., 29, pp. 990-994.
- [12] Konoplyuk, S., (2010) Estimation of Pearlite Fraction in Ductile Cast Irons by Eddy Current Method. NDT&E International, 43, pp. 360-364.
- [13] Khan, S. H., Ali F., Nusair, K. A., Iqbal, M .A., (2008) Pearlite Determination in Plain Carbon Steel by Eddy Current Method. J. Mater. Pro. Tech., 200, pp. 318-318.
- [14] Choteborsky R., (2013) Effect of Heat Treatment on the Microstructure, Hardness and Abrasive Wear Resistance of High Chromium Hardfacing. J. Agri. Eng. Res., 29, pp. 23-28.
- [۱۵] جواهری، م؛ عباسی؛ (۱۳۹۶) ارزیابی ریزساختار و سختی قطعات ریختگی عملیات حرارتی شده با آزمون

## Non-Destructive Evaluation of High Chromium Cast Iron Mill Balls with Eddy Current Test

Mojtaba Javahery<sup>1</sup>, Majid Abbasi<sup>\*2</sup>, Nima Azizi<sup>3</sup> and Seyed Mohamad Ali Boutorabi<sup>4</sup>

1- MSc. in Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- MSc. in Materials Engineering, Iran University of Industries and Mines, Tehran, Iran,

4- Professor, School of Metallurgy and Materials, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

\*abbasim@nit.ac.ir

### Abstract

In this paper, the eddy current nondestructive testing method was presented to evaluate the residual austenite in the microstructure and hardness of high chromium cast iron mill balls. For this purpose, some 40 mm high alloy cast iron balls with 30 wt.% Cr and 3 wt.% C nominal composition were selected after sand casting process. To achieve the different hardness and different residual austenite contents in the microstructure, the balls were heat treated at different austenitizing and tempering temperatures. The microstructural studies using by optical and scanning electron microscopies, XRD and Vickers hardness were performed on the samples. Then, the microstructures of the samples were evaluated using an eddy current device at 50 to 200 kHz frequencies. The result showed that, using the eddy current method, different microstructures of the balls with different values of residual austenite and hardness can be identified and separated, rapidly and nondestructively. To the purpose, the eddy current inspection at 150 kHz frequency is selected using the impedance index as a non-destructive evaluation method. This index decreases with increasing residual austenite content.

**Keywords:** Non-Destructive Evaluation, Eddy Current, High Chromium Cast Iron, Mill Balls, Residual Austenite