

## اندازه‌گیری اثرات تخریبی پرتوی گاما بر خواص فیزیکی فولاد

زهرا امیرسرداری و محمدرضا عبدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: r.abdi@phys.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۱۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۰/۰۲)

### چکیده

در این پژوهش پرکاربردترین فولادهای ضدزنگ در صنعت هسته‌ای از قبیل ۳۰۴، ۳۰۴L و ۳۱۶L تهیه و توسط لیزر با ابعاد ۰/۵ در ۰/۵ سانتی‌متر برش داده شد. تأثیر تابش بر خواص فیزیکی نمونه‌ها بررسی شد. تابش دهی گاما بر روی نمونه‌ها با یک رادیو ایزوتوپ  $^{60}\text{Co}$  با دزهای ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگری انجام شد. مقاومت نمونه‌ها به روش چهارپروب اندازه‌گیری گردید و مقاومت ویژه و رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها از مقاومت محاسبه شد. با استفاده از قانون ویدمان-فرانتس رسانندگی حرارتی نمونه‌ها به دست آمد. همچنین خواص مغناطیسی با دستگاه مغناطش سنج نمونه ارتعاشی اندازه‌گیری شد. تغییرات در خواص ذکر شده قبل و بعد از تابش دهی در نمونه‌ها با تأثیر دما و زمان ماندگاری تابش دهی در نمونه‌ها بررسی گردید.

واژه‌های کلیدی: فولاد ضد زنگ، چهار پروب، ویدمان فرانتس، مغناطش سنج ارتعاشی

### ۱. مقدمه

تولید می‌شود. در طی قرون اخیر فولاد و آهن نقش مهمی در صنایع و پیشرفت کشورها داشته‌اند به طوری که به عنوان یک کالا و صنعت استراتژیک مورد توجه بوده‌اند [۱]. خواص فولاد به درصد کربن موجود در آن، عملیات حرارتی انجام شده بر روی آن و همچنین به روش ساخت آن بستگی دارد [۲]. در این پژوهش سه نوع فولاد ضدزنگ آستنیتی سری ۳۰۰ تهیه شد. بیش از ۶۰ درصد فولادهای آستنیتی مورد استفاده در صنایع و نیروگاه‌های هسته‌ای فولادهای ۳۰۴، ۳۱۶ و ترکیب‌های کم کربن آنها یعنی ۳۰۴L و ۳۱۶L هستند [۳، ۴].

فلزات و آلیاژها جامدهای بلوری هستند به طوری که اتم‌های یک فلز در شبکه‌های معینی قرار دارند که از تکرار آنها جامد فلزی حاصل می‌شود. خواص مواد از جمله فلزات علاوه بر ترکیب شیمیایی به نوع پیوند بین آنها، نحوه آرایش یا فرارگیری اتم‌ها در کنار یکدیگر، ساختار شبکه بلور و زیر ساختار آنها بستگی دارد به طوری که ممکن است با تغییر هرکدام از این عوامل مذکور خواص فیزیکی، مکانیکی، الکتروسیسته، جوشکاری و ... تغییر کند. فولاد یکی از مهم‌ترین آلیاژهاست و همه ساله میلیون‌ها تن از آن در جهان

یک مدل ساده کلاسیکی از رسانش الکترون‌ها، با فرض این که انتقال گرما و الکتریکی توسط الکترون‌های آزاد انجام می‌شود قابل توجیه است و در آن  $k_e$  رسانندگی گرمایی ناشی از الکترون‌های رسانش است [۷ و ۸]. پس از بررسی خواص فوق، خاصیت مغناطیسی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت، چون که در بین روش‌های مغناطیسی، روش نمونه مرتعش متداول‌تر است [۹]. خاصیت مغناطیسی نمونه‌ها به وسیله دستگاه مغناطش‌سنج ارتعاشی دانشگاه کاشان انجام پذیرفت. تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام شده است. جدول‌های ۱ تا ۳ به ترتیب خواص فیزیکی و جدول‌های ۴ تا ۶ به ترتیب خواص مغناطیسی، نمونه‌های شاهد و تابش دیده را در دمای اتاق نشان می‌دهد.

باتوجه به جدول ۱ مقاومت فلزات قبل از تابش‌دهی به عناصر تشکیل دهنده آنها، اندازه یون فلزات و تعداد الکترون‌هایی که هر یون در حوزه اشتراکی دارد بستگی دارد. در شرایط بدون تابش‌دهی مقاومت ویژه فولاد  $304L$  با مقدار عددی  $10/258 \mu\Omega.m$  تقریباً  $2/5$  برابر دو نمونه دیگر است پس به همین میزان رسانندگی الکتریکی آن کمتر می‌شود. از طرفی کربن یک عنصر بسیار مهم در نمونه‌ها می‌باشد که رسانندگی حرارتی بالایی دارد و با توجه به بالا بودن کربن در فولاد  $304$  نسبت به دو نمونه دیگر دیده می‌شود که رسانندگی حرارتی فولاد  $304$  از بقیه نمونه‌ها در شرایط بدون تابش‌دهی در دمای اتاق بیشتر است.

در جدول ۲ یعنی در دز  $100$  کیلوگری باز هم فولاد  $304L$  مقاومت ویژه بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد. افزایش مقاومت ویژه فولاد  $304L$  در دز  $100$  کیلوگری در دمای اتاق را می‌توان به نقص‌ها و تهی‌جای ناشی از تشعشع‌ها و برهم‌کنش الکترون‌ها با تهی‌جاها نسبت داد. همچنین نقص‌های نقطه‌ای در بلور باعث وقفه در دوره تناوب شبکه شده و مقاومت ویژه را افزایش می‌دهد. نقص‌های ناشی از تشعشع باعث پراکندگی فونون‌ها و حاملان گرما شده در نتیجه رسانندگی الکتریکی و حرارتی کاهش و مقاومت ویژه افزایش می‌یابد. رسانندگی الکتریکی فولاد  $304L$  کاهش یافته زیرا نقص‌های به وجود آمده باعث انحراف الکترون‌ها شده و به نظر

## ۲. روش‌های آزمایش

### ۱.۲. تابش‌دهی نمونه‌ها

از آنجا که برش دادن فلزات با لیزر بسیار دقیق بوده و هیچ خطایی ندارد نمونه‌ها در ابعاد  $5$  میلی‌متر در  $5$  میلی‌متر با لیزر برش داده شدند. سپس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه صنعتی IR-136 واقع در سازمان انرژی اتمی تهران، تحت تابش گاما با رادیویزوتوپ کبالت-۶۰ در دزهای  $100$  و  $200$  کیلوگری قرار گرفتند. استفاده از پرتوی گاما به این علت است که تابش‌دهی با گاما مزایای بسیاری نسبت به روش‌های دیگر دارد، به طور مثال محصولات بلافاصله بعد از پرتودهی قابل استفاده می‌باشند، کمترین افزایش دما در محصولات در طی فرایند پرتودهی صورت می‌گیرد و..... پس از آماده‌سازی نمونه‌ها خواص فیزیکی بررسی گردید. مقاومت فلزات به روش چهارپروب در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی اصفهان اندازه‌گیری شد. در واقع بر روی هر نمونه یک چهارپروب به کار گرفته شد که با توجه به ابعاد نمونه، کار بسیار مشکلی بود. با برقراری جریان‌های مختلف و اندازه‌گیری ولتاژ بین دو اتصال وسطی با استفاده از ولت‌متر با مشخصات (KEITHLEY 2182nvm)، نمودار پتانسیل بر حسب جریان رسم شد. از نمودارهای V-I مقاومت و سپس با استفاده از رابطه زیر، مقاومت ویژه نمونه‌ها محاسبه شد.

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (1)$$

$l$  فاصله بین دوپروب وسطی و  $A$  سطح مقطع نمونه است.

با در دسترس داشتن مقاومت ویژه با استفاده از رابطه (۲) و (۳) برای محاسبه رسانندگی الکتریکی و حرارتی (قانون ویدمن-فرانتس به شرط این که رسانش تنها توسط الکترون‌ها انجام شده باشد) استفاده کردیم.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

$$\frac{k_e}{\sigma} = LT \left( \frac{K_B}{e} \right)^2 T \frac{\pi^2}{3}, \quad (3)$$

$L$  عدد لورنتس و یک ثابت نظری است.  $L$  مستقل از دما است و

مقدار آن برابر  $2/44 \times 10^{-8} \frac{\Omega.w}{K^2}$  و برای فلزات مختلف مشابه

است و به خواص مواد بستگی ندارد [۵ و ۶]. این قانون بر مبنای

جدول ۱. مقادارهای  $R$ ،  $\rho$ ،  $\sigma$  و  $K$  برای نمونه‌های شاهد.

نمونه‌های بدون تابش	فاصله دو پروب (mm)	مقاومت $\pm 0.001$ ( $\Omega \times 10^4$ )	مقاومت ویژه ( $\mu\Omega.m$ )	رسانندگی الکتریکی ( $1/\Omega.m$ ) $\times 10^5$	رسانندگی حرارتی (w/m.k)
۳۰۴	۱٫۵	۲٫۴۸۷	۰٫۴۴±۴٫۱۴	۰٫۲۵±۲٫۴۱	۰٫۱۸±۱٫۷۵
۳۰۴L	۱٫۶	۶٫۵۶۶	۱٫۰۵±۱۰٫۲۵	۰٫۰۹±۰٫۹۷	۰٫۰۶±۰٫۷۰
۳۱۶L	۱٫۷	۲٫۸۶۸	۰٫۴۷±۴٫۲۱	۰٫۲۳±۲٫۳۷	۰٫۱۷±۱٫۷۲

جدول ۲. نتایج  $M_s$  و  $H_c$  نمونه‌های شاهد.

نمونه‌های شاهد			خواص مغناطیسی
۳۱۶L	۳۰۴L	۳۰۴	
۵۷٫۶۳	۵۹٫۵۴۷	۵۵٫۱۹۶	نیروی وادارندگی (Oe)
۱٫۵۴۴	۳٫۶۶۳	۶٫۵۶۹	مغناطش اشباع (emu/g) $\pm 0.0001$

جدول ۳. مقادارهای  $R$ ،  $\rho$ ،  $\sigma$  و  $K$  برای نمونه‌ها در دز ۱۰۰ کیلوگری با تأثیر دما.

نمونه‌ها	فاصله دو پروب (mm)	مقاومت $\pm 0.001$ ( $\Omega \times 10^{-4}$ )	مقاومت ویژه ( $\mu\Omega.m$ )	رسانندگی الکتریکی ( $1/\Omega.m$ ) $\times 10^5$	رسانندگی حرارتی (w/m.k)
۳۰۴	۱٫۸	۳٫۰	۰٫۳۹±۴٫۱۶	۰٫۲۲±۲٫۴۰	۰٫۳۴±۳٫۶۵
۳۰۴L	۱٫۹	۸٫۰	۰٫۹۷±۱۰٫۵۲	۰٫۰۸±۰٫۹۵	۰٫۱۷±۲٫۰۲
۳۱۶L	۱٫۵	۳٫۰	۰٫۵۳±۵٫۰	۰٫۲۱±۲٫۰	۰٫۴۶±۴٫۲۶

جدول ۴. مقادارهای  $R$ ،  $\rho$ ،  $\sigma$  و  $K$  برای نمونه‌ها در دز ۲۰۰ کیلوگری با تأثیر دما.

نمونه‌ها	فاصله دو پروب (mm)	مقاومت $\pm 0.001$ ( $\Omega \times 10^{-4}$ )	مقاومت ویژه ( $\mu\Omega.m$ )	رسانندگی الکتریکی ( $1/\Omega.m$ ) $\times 10^5$	رسانندگی حرارتی (w/m.k)
۳۰۴	۲٫۰	۳٫۰	۰٫۳۳±۳٫۷۵	۰٫۲۳±۲٫۶۶	۰٫۳۶±۴٫۰۵
۳۰۴L	۱٫۹	۷٫۰	۰٫۸۵±۹٫۲۱	۰٫۱۰±۱٫۰۸	۰٫۲۲±۲٫۳۱
۳۱۶L	۱٫۶	۲٫۰	۰٫۳۲±۳٫۱۲	۰٫۳۲±۳٫۲۰	۰٫۷۰±۶٫۸۲

جدول ۵. نتایج  $M_s$  و  $H_c$  نمونه‌ها در دز ۱۰۰ کیلوگری با تأثیر دما.

نمونه‌ها			خواص مغناطیسی
۳۱۶L	۳۰۴L	۳۰۴	
۱۵۶٫۹۸۰۱۲	۹۶٫۷۰۷۷	۳۱٫۴۴۰۳۲	نیروی وادارندگی (Oe)
۰٫۹۵۹۴۷	۰٫۶۱۳۶۶	۷٫۰۰۱۶۸	مغناطش اشباع (emu/g) $\pm 0.0001$

جدول ۶. نتایج  $M_s$  و  $H_c$  نمونه‌ها در دز ۲۰۰ کیلوگری با تأثیر دما.

نمونه‌ها			خواص مغناطیسی
۳۱۶L	۳۰۴L	۳۰۴	
۱۱۹,۲۸۰	۹۲,۳۱۲۹۴	۶۲,۱۰۷۸۵	نیروی وادارندگی (Oe)
۰,۸۷۱۷	۰,۶۲۴۵۶	۴,۵۷۵۸۲	مغناطش اشباع (emu/g) $\pm 0,0001$

جدول ۷. مقدارهای  $R$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$  و  $K$  برای نمونه‌ها با دز ۱۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.

نمونه‌ها	فاصله دو پروب (mm) $\pm 0,1$	مقاومت $\pm 0,001$ ( $\Omega$ ) $\times 10^{-4}$	مقاومت ویژه ( $\mu\Omega.m$ )	رسانندگی الکتریکی ( $1/\Omega.m$ ) $\times 10^5$	رسانندگی حرارتی (w/m.k)
۳۰۴	۱,۵	۲,۰۱۸	۰,۳۶ $\pm$ ۳,۳۶	۰,۳۱ $\pm$ ۲,۹۷	۰,۲۳ $\pm$ ۲,۱۶
۳۰۴L	۱,۶	۶,۹۹۷	۱,۰۵ $\pm$ ۱۰,۵۳	۰,۰۹ $\pm$ ۰,۹۴	۰,۰۱ $\pm$ ۰,۶۹
۳۱۶L	۱,۶	۲,۹۸۳	۰,۴۷ $\pm$ ۴,۶۶	۰,۲۱ $\pm$ ۲,۱۴	۰,۱۵ $\pm$ ۱,۵۵

جدول ۸. مقدارهای  $R$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$  و  $K$  برای نمونه‌ها با دز ۲۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.

نمونه‌ها	فاصله دو پروب (mm) $\pm 0,1$	مقاومت $\pm 0,001$ ( $\Omega$ ) $\times 10^{-4}$	مقاومت ویژه ( $\mu\Omega.m$ )	رسانندگی الکتریکی ( $1/\Omega.m$ ) $\times 10^5$	رسانندگی حرارتی (w/m.k)
۳۰۴	۱,۵	۲,۸۷۲	۰,۵۱ $\pm$ ۴,۷۸	۰,۲۲ $\pm$ ۲,۰۸	۰,۱۶ $\pm$ ۱,۵۱
۳۰۴L	۱,۷	۶,۹۶۶	۱,۰۱ $\pm$ ۱۰,۲۴	۰,۰۹ $\pm$ ۰,۹۷	۰,۰۶ $\pm$ ۰,۷۰
۳۱۶L	۱,۵	۲,۸۶۹	۰,۵۱ $\pm$ ۴,۷۸	۰,۲۲ $\pm$ ۲,۰۹	۰,۱۶ $\pm$ ۱,۵۲

جدول ۹. نتایج  $M_s$  و  $H_c$  نمونه‌ها در دز ۱۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.

نمونه‌ها			خواص مغناطیسی
۳۱۶L	۳۰۴L	۳۰۴	
۶۲,۲۶	۴۶,۷۴	۴۷,۳۷	نیروی وادارندگی (Oe)
۰,۸۸۲۳	۲,۱۲۸۲	۳,۱۷۰۲	مغناطش اشباع (emu/g) $\pm 0,0001$

جدا شدن الکترون‌های لایه داخلی شده و افزایش غلظت حاملان بار بر عیوب غلبه کرده در نتیجه مقاومت ویژه کاهش پیدا کرده است. با افزایش دز تابش‌دهی مقاومت ویژه و رسانندگی فولادها به سمت نمونه‌های شاهد میل می‌کنند که در مقایسه جدول‌های ۱ و ۳ به خصوص در مورد فولاد L ۳۱۶ کاملاً آشکار است. در واقع نقص‌های تولید شده از یک حلدی بیشتر، نقش اضافی در پراکندگی الکترون‌ها ندارند و این می‌تواند دلیلی باشد برای این که اعداد به سمت نمونه‌های شاهد میل کنند.

با توجه به جدول‌های ۴، ۵، ۶ در شرایط بدون تابش‌دهی

می‌آید که ساختار، کمی بی‌نظم شده و چنین ساختار بی‌نظمی یک میانگین مسیر کوتاهی برای حرکت الکترون‌ها دارد. اگر سرعت الکترون‌ها کم شود تحرک حامل‌ها کم می‌شود در نتیجه هر تابشی که باعث بی‌نظمی در ساختار بلور شود باعث افزایش مقاومت ویژه و کاهش رسانندگی الکتریکی می‌شود و با کم شدن سرعت الکترون‌ها رسانندگی حرارتی کم شده است. تفاوت در رسانندگی حرارتی فولادها به طور مستقیم وابسته به ناخالصی‌ها و عیوب ریزساختاری است.

در جدول ۳ تابش طولانی مدت در دز ۲۰۰ کیلوگری باعث

زیرکونیوم و... هستند. با در نظر گرفتن خنک کننده‌ها میله‌های فولادی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارند.

در تمامی صنایع به ویژه راکتورها لوله‌های بخار، انتقال آب و تمامی شیرها از جنس فولاد ۳۰۴ هستند. لوله‌های بخار اصولاً بین دمای ۵۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند. با توجه به مطالب مذکور بنابراین برای فولاد ۳۰۴، دمای ۳۵۰ درجه و برای فولادهای ۳۰۴L و ۳۱۶L، دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد.

پس از تعیین دما، نمونه‌ها به مدت یک ساعت درون کوره آزمایشگاه قرار گرفته و پس از بازپخت نمودن آزمایش‌ها دوباره بر روی آنها انجام گرفت و خواص فیزیکی بار دیگر بررسی شد که نمودار ولتاژ- جریان نمونه‌های تابش دیده تحت تأثیر دما برای محاسبه خواص الکتریکی نمونه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. داده‌های حاصل از نتایج آزمایش تأثیر دما بر خواص فیزیکی نمونه‌ها در جدول‌های ۷ و ۸ قابل رویت هستند.

بیشترین و کمترین مغناطش اشباع به ترتیب مربوط به فولادهای ۳۰۴ و ۳۱۶L است. اختلاف زیاد بین اشباع‌های مغناطیسی ناشی از اثرات ناخالصی‌های و بی‌نظمی‌هایی در طول آماده‌سازی نمونه است. همچنین در شرایط بدون تابش دهی نیروی وادارندگی در فولاد ۳۰۴L از بقیه بیشتر است. بالا بودن نیروی وادارندگی بدان معناست که ماده مانند یک آهنربای پایدار عمل می‌کند و نمی‌خواهد به راحتی تغییر جهت دهد. با افزایش دز پرتو دهی مغناطش اشباع در نمونه‌ها کمتر شده و نیروی وادارندگی افزایش یافته است. می‌دانیم که مغناطش اشباع زمانی به وجود می‌آید که تمامی گشتاورهای مغناطیسی با میدان هم‌جهت شوند و همچنین پس از آن رشد دیواره‌ها را داشته باشیم، عیوب‌های به وجود آمده از تابش با دیواره‌های حوزه بر هم‌کنش داشته و مانع رشد دیواره‌ها می‌شوند در نتیجه با کاهش مغناطش اشباع روبه‌رو می‌شویم. همچنین کم بودن نیروی وادارندگی در ۲۰۰ کیلوگری نسبت به ۱۰۰ کیلوگری با وجود نقص‌های زیادتر به ناهمسانگردی‌های موجود در ورقه‌های فولادهای تجاری مرتبط است.

## ۲.۲. تأثیر دما بر نمونه‌ها

بازپخت نمودن راهی برای بهبود خواص و ساختار مواد در معرض تابش است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که اصولاً در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بازپخت نمودن مواد باعث حرکت تهی‌جاها و در واقع باعث تغییراتی در پیکربندی نقص‌های ناشی از تشعشع یا ناپدید شدن آنها می‌شود، که این همان درجه حرارت بازیابی صدمات بمباران ذرات اتمی است [۱۰]. با مطالعه ساختمان صنایع هسته‌ای متوجه شدیم که دما در آنها به عوامل زیادی از جمله نوع واکنش (گرماگیر یا گرمازا)، ملاحظات ایمنی و... بستگی دارد. فولاد ۳۰۴ در تمامی صنایع کاربرد دارد اما فولادهای ۳۰۴L و ۳۱۶L اکثراً در راکتورهای گازی پیشرفته و راکتورهای PWR<sup>۱</sup> و FBR<sup>۲</sup> کار می‌روند. سرمخزن راکتور و میله‌های سوخت در راکتور از جنس فولادهای ۳۰۴L و ۳۱۶L به اضافه مهم‌ترین عوامل یعنی

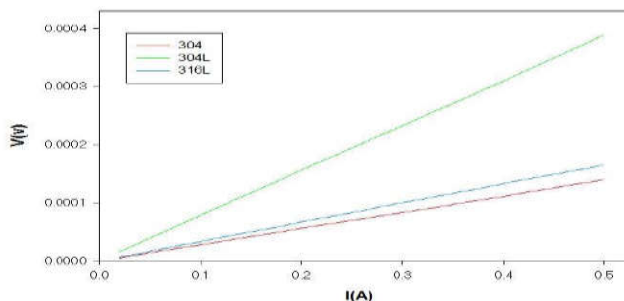
## ۲.۱. تفسیر تأثیر دما بر خواص $R, \rho, \sigma$ و $K$

### نمونه‌های تابش دیده

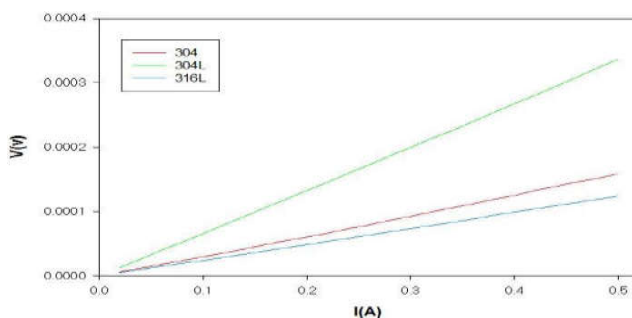
افزایش مقاومت ویژه نمونه‌ها در شرایط تابش دهی با افزایش دما علاوه بر پراکندگی الکترون و فونون‌ها به عیوب‌های ناشی از ساخت ماده نیز بستگی دارد. با این که با افزایش دما امکان درست شدن جابه‌جایی‌ها حاصل از تشعشع‌ها است اما از طرفی دیگر با افزایش دما رشد نقص‌های (تهی‌جاها) حاصل از ساخت ماده وجود دارد. در واقع در دماهای بالا رشد بعضی از عیوب‌ها همراه با از بین رفتن برخی دیگر است. همچنین افزایش رسانندگی و کاهش مقاومت ویژه را می‌توان به آزاد شدن الکترون‌های مقید هسته اتم در اثر دمای بالا نسبت داد. رسانندگی حرارتی نمونه‌ها قبل و بعد از تابش با افزایش دما انحطاط پیدا نکرده است حتی مقدار آن کمی بیشتر از قبل شده است و با قانون ویدمان-فرانتس سازگاری دارد و این اثر غیرمخرب می‌تواند به برانگیخته شدن مدهای فونونی بیشتر نسبت داده شود [۱۱]. همچنین با

۱. Pressurized Water Reactor

۲. Fast Breeder Reactor



شکل ۱. نمودارهای V-I نمونه‌ها بادز ۱۰۰ کیلوگرمی فولاد ۳۰۴، ۳۰۴L و ۳۱۶L با تأثیر دما.



شکل ۲. نمودارهای V-I نمونه‌ها بادز ۲۰۰ کیلوگرمی فولاد ۳۰۴، ۳۰۴L و ۳۱۶L با تأثیر دما.

و ادارندگی در تمامی نمونه‌ها به جز فولاد ۳۰۴ در ۱۰۰ کیلوگرمی افزایش داشته است. همچنین با افزایش نیروی و ادارندگی، سخت شدن نمونه‌های فرومغناطیس در شکل دیده می‌شود. با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول‌های (۹) و (۱۰) کاهش نیروی و ادارندگی در فولادها را می‌توان به مقدار بالای عنصر سیلیسیم در این نمونه‌ها نسبت داد. چون عنصر سیلیسیم باعث کاهش ناهمسانگردی‌های مغناطوس بلوری می‌شود و باعث چرخش آسانتر حوزه‌ها می‌شود در نتیجه مغناطوس اشباع افزایش و نیروی و ادارندگی کاهش می‌یابد [۱۲-۱۴].

### ۳. تأثیر زمان ماندگاری اثر تابش

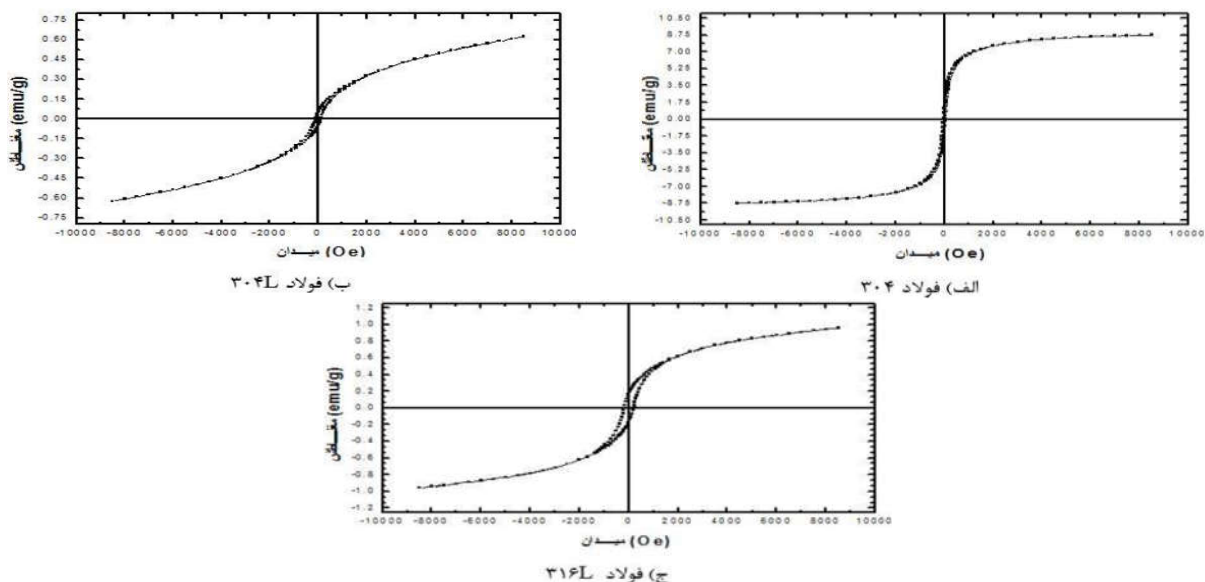
برای بررسی ماندگاری اثر تابش بر نمونه‌ها، نمونه‌های تابش دیده پس از ۹۸ روز ماندگاری در دمای اتاق مجدداً در آزمایش‌های الکتریکی و مغناطوسی نمودارهای ولتاژ-جریان و پسماندشان رسم گردید (شکل‌های ۵ تا ۸) و نتایج خواص فیزیکی الکتریکی و مغناطوسی آنها در جداول ۱۱ تا ۱۳ استخراج گردید.

افزایش دما میانگین مسیر حامل‌ها بیشتر شده و رسانندگی حرارتی افزایش یافته است.

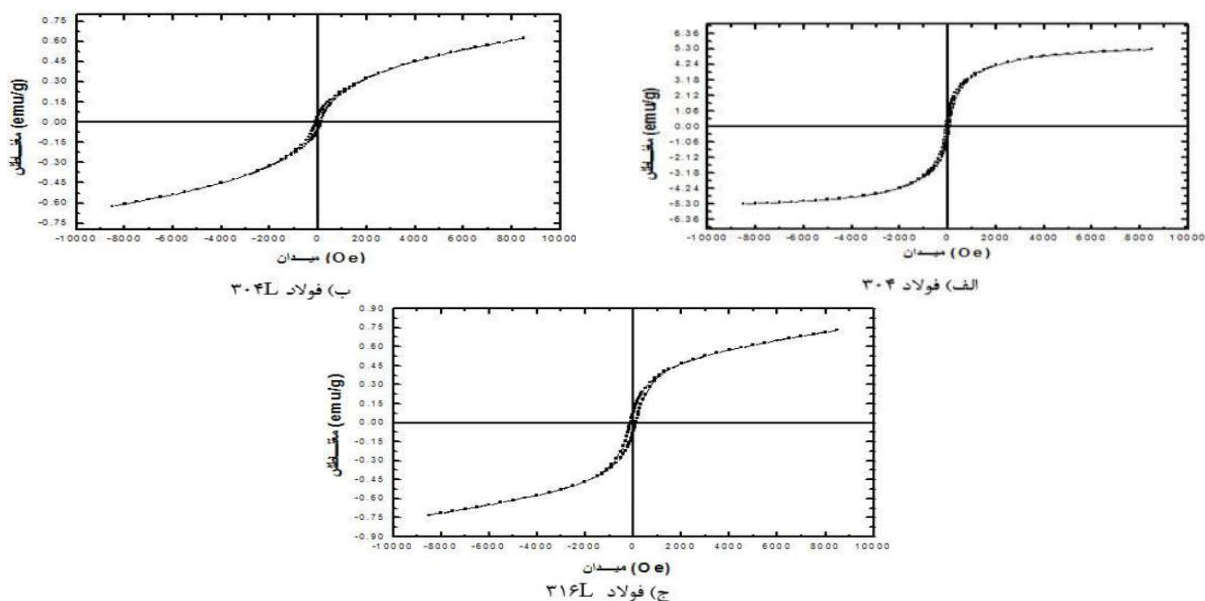
جدول‌های ۷ و ۸ بیان می‌کنند تنها رسانندگی حرارتی فولاد ۳۰۴L در دز ۲۰۰ کیلوگرمی با افزایش دما، کاهش یافته است و این به دلیل افزایش بالای نقص‌های ناشی از ساخت در این فولاد است که باعث افزایش ناگهانی مقاومت ویژه از ۱/۰۵۱ به ۹/۲۱۱ شده و این نقص‌ها باعث پراکندگی فونون‌ها و حامل‌ها در دماهای بالا شده است و از آنجا که فونون‌ها نقش مهمی در آلیاژها دارند پس رسانندگی حرارتی در این مورد از ۶/۹ به ۲/۳ کاهش پیدا کرده است.

### ۲.۲.۲. تفسیر تأثیر دما بر نتایج $M_s$ و $H_c$ نمونه‌ها

با رسم منحنی پسماند نمونه‌های تابش دیده بازپخت شده در دماهای مختلف (شکل ۳ و ۴) خواص مغناطوسی نمونه‌ها را به دست می‌آوریم. همان طور که بیان شد با افزایش دما نقص‌های ناشی از ساخت (تهی‌جاها) افزایش داشته و این موضوع باعث کاهش مغناطوس اشباع و افزایش نیروی و ادارنده می‌شود، نیروی



شکل ۳. اثر دما در منحنی پسماند نمونه‌ها در دز ۱۰۰ کیلوگری (فولاد ۳۰۴ در دمای ۳۵۰ درجه و فولادهای ۳۰۴L و ۳۱۶L در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد).

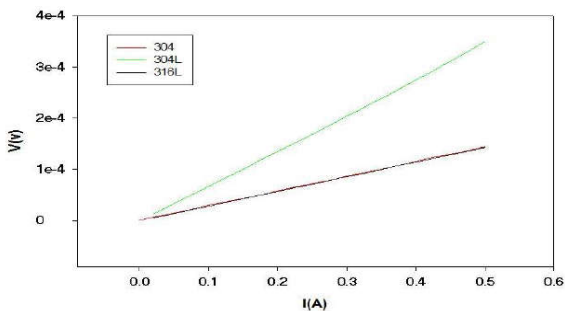


شکل ۴. اثر دما در منحنی پسماند نمونه‌ها در دز ۲۰۰ کیلوگری (فولاد ۳۰۴ در دمای ۳۵۰ درجه و فولادهای ۳۰۴L و ۳۱۶L در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد).

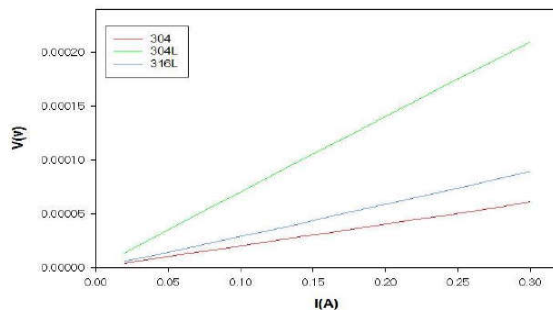
#### ۴. تفسیر تأثیر زمان بر خواص فیزیکی نمونه‌ها

با مقایسه جدول‌های ۲ و ۳ با جدول‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌کنیم که در ۱۰۰ کیلوگری در فولاد ۳۰۴ پس از گذشت زمان ۹۸ روز مقاومت ویژه به مقداری افزایش داشته و رسانندگی الکتریکی و حرارتی کمتر شده‌اند و این مقدار کم امکان دارد به دلیل تجمع نقص‌های ناشی از ساخت در

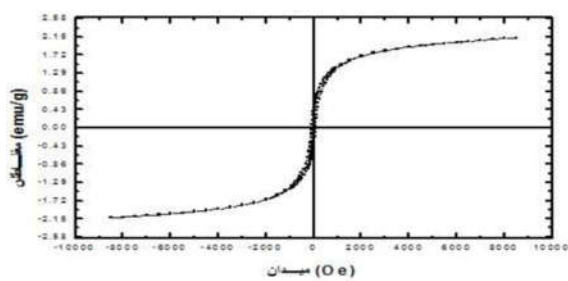
مرزدانه‌ها باشد که همچنین باعث تنزل  $M_s$  شده است. در فولاد ۳۱۶L نیز همین وضعیت برقرار است و نیروی وادارندگی از  $56/999 \text{ Oe}$  به  $62/26 \text{ Oe}$  رسیده است. فولاد ۳۰۴L رفتاری معکوس داشته و با گذشت زمان نقص‌ها از بین رفته و مقاومت ویژه کم و رسانندگی الکتریکی افزایش یافته است، همچنین با مقایسه جدول‌های ۴ و ۵ با جدول‌های ۱۳ و ۱۴ با کم شدن



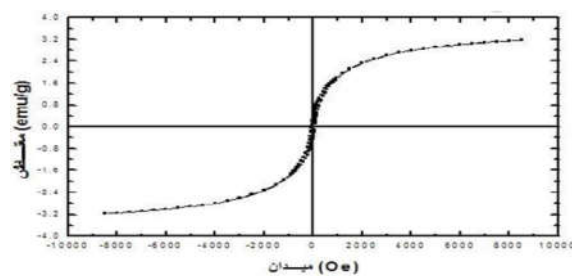
شکل ۶. نمودارهای V-I نمونه‌ها با دز ۲۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.



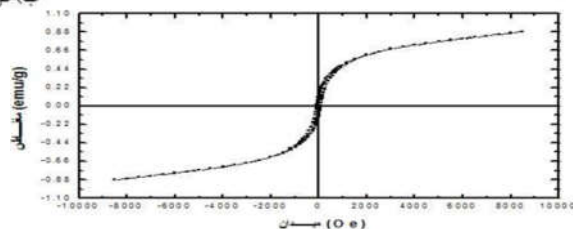
شکل ۵. نمودارهای V-I نمونه‌ها با دز ۱۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.



ب) فولاد ۳۰۴L

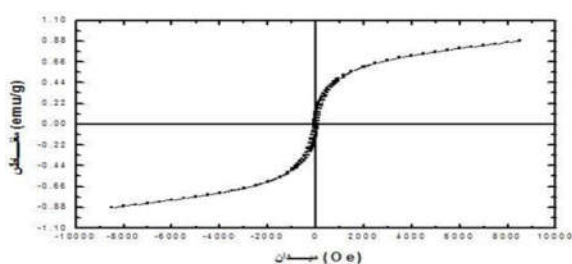


الف) فولاد ۳۰۴

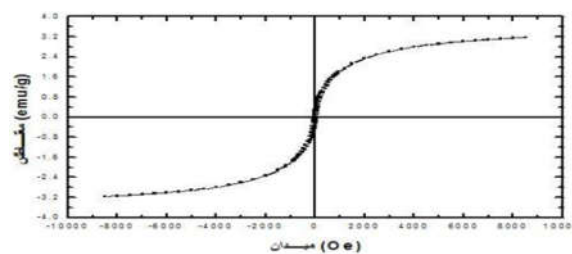


ج) فولاد ۳۱۶L

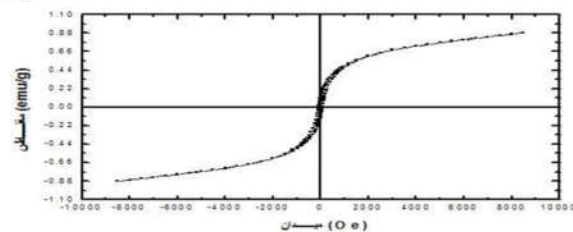
شکل ۷. منحنی‌های پسماند نمونه‌ها با دز ۱۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.



ب) فولاد ۳۰۴L



الف) فولاد ۳۰۴



ج) فولاد ۳۱۶L

شکل ۸. منحنی‌های پسماند نمونه‌ها در دز ۲۰۰ کیلوگری پس از ۹۸ روز.



نقص‌ها نیروی وادارندگی به شدت افت پیدا کند. نمونه فولادی ۳۱۶L پس از گذشت ۹۸ روز سریع‌تر از دو نمونه دیگر به شاهد نزدیک می‌شود.

در ۲۰۰ کیلوگرمی هر سه فولاد به حالت شاهد میل کرده‌اند و با از بین رفتن نقص‌های ناشی از تشعشع، افزایش مغناطش و کاهش نیروی وادارندگی در مقایسه کردن جدول‌ها کاملاً دیده می‌شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

در آلیاژها نقص‌های حاصل از تشعشع در ابتدا اختلال ایجاد می‌کنند اما پس از زمان خاصی نقص‌ها از بین رفته و شبکه بلوری مرتب می‌شود. در واقع در فرایند یونش هنگامی که تابش مورد نظر به پیوند فلزی برخورد می‌کند باعث می‌شود الکترون‌ها برانگیخته شوند، اما به سرعت به سطح طبیعی خود باز می‌گردند به همین دلیل در فرایند یون آسیب‌های دائمی وجود ندارد اگر هم باشد به صورت موقت است. در واقع تابش

باعث یونش موقت از اتم‌های شبکه می‌شود. از آنجا که اختلاف مقادیر تأثیر دما بر نمونه‌های تابش دیده با نمونه‌های شاهد زیاد نیست و در واقع اختلاف‌های معناداری نیستند، می‌توان گفت که فولاد ۳۰۴، با تابش دهی ۲۰۰ کیلوگرمی می‌تواند همچنان دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد را نیز تحمل کند و فولادهای ۳۰۴L و ۳۱۶L نیز قابلیت تحمل تابش دهی تا ۲۰۰ کیلوگرمی را همراه با دمای ۶۰۰ درجه نیز دارند و تغییرات چشمگیری در آنها دیده نمی‌شود. در واقع در هر سه فولاد به ویژه فولاد ۳۰۴L امکان استفاده و بهره‌برداری هم زمان دما و دز وجود دارد.

هر چه زمان بازگشت نمونه‌های فولادی به سمت شاهد کوتاه‌تر بهتر است، زیرا قابلیت استفاده مجدد از آنها بیشتر است. نتایج نشان می‌دهند که قابلیت استفاده پس از مدت زمان ۹۸ روز در فولاد ۳۱۶L بیشتر از ۳۰۴ و در فولاد ۳۰۴ بیشتر از ۳۰۴L است.

## مراجع

1. D T Liewellyn, "Stainless Steel", Harrison (1992) 214.
2. W Smith, "Structure and Properties of Engineering Materials", McGraw-Hill (1987) 23.
3. V Gann and O V Ogorodnikova, *Journal of Nuclear Materials* **460** (2015) 60.
4. J M K Wiezorek, Y Huang, F A Garner, P D Freyer, M Sagisaka, and Y Isobe, *Journal of Iron and Steel* **6** (2014) 1822.
5. M V Peralta-Martinez, M J Assael, M J Dix, L Karagiannidis, and W A Wakeham, *Ionol Journal of Springer* **2** (2006) 353.
6. C Alper Billur, E Gerçekcioglu, M Bozoklu, B Saatçi, M Ari, and F Nair, *Journal of Alloys Thermal Conductivity Measurements* **21** (2015) 1.
7. A Vieirada Rosa, "Fundamentals of Renewable Energy Processes", Elsevier Academic press (2009).
8. G Grosso and G P Parravicin, "Solid State Physics", Academic Press (2009).
9. D Jiles, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", Chapman & Hall (1998).
۱۰. س ع سبط و م اخوان، مجله پژوهش فیزیک ایران ۳، ۳ (۱۳۸۱) ۱۹۹.
10. S A Sebt and M Akhavan, *Iranian Journal of Physics Research* **3**, 3 (2002) 199.
11. W Seog Ryu, D Gyu Park, U Sup Song, J Seok Park and S Bok Ahn, *Journal of Nuclear Engineering and Technology* **45** (2012) 219.
12. T W Shyr, S J Huang, and C S Wur, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **419** (2016) 400.
13. B A Gurovich, E A Kuleshova, A S Frolov, D A Maltsev, K E Prikhodko, S V Fedotova, B Z Margolin, and A A Sorokin, *Journal of Nuclear Materials* **465** (2015) 565.
14. H Shokrollahi, *Materials and Design* **30** (2009) 3374.