

مطالعه تأثیر حساس شدن بر رفتار خوردگی فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 در ناحیه ترانس پسیو

خشایار مرشد بهبهانی^۱، پوریا نجفی سیار^{۲*}، محمود پاکشیر^۳

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*pnajafi@shirazu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۳۱)

چکیده

در این پژوهش، رفتار خوردگی بین دانه‌ای فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 در محلول "۲ مولار اسید سولفوریک + ۱ مولار اسید کلریدریک" در دمای °C ۳۰ با استفاده از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، راکتیواسیون پتانسیوکیتمیک الکتروشیمیایی دو حلقه‌ای (DLEPR)، تفرق اشعه‌ایکس و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مورد بررسی قرار گرفت. طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، برای نمونه‌هایی با درجات مختلفی از حساس شدن به مدت ۱ و ۵ ساعت در دمای °C ۷۲۵، وجود سه رفتار متفاوت را در پتانسیل‌های مختلف ناحیه ترانس پسیو نشان داد. نتایج بررسی حاکی از کاهش مقاومت انتقال بار (R_{ct}) و مقاومت پلاریزاسیون (R_p) در اثر افزایش زمان حساس شدن می‌باشد و این نتایج با تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از سطح نمونه‌های خورده شده همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی:

فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205، خوردگی بین دانه‌ای، امپدانس الکتروشیمیایی.

۱- مقدمه

و سایر ترکیبات بین‌فلزی مانند فاز سیگما و چای، تضعیف می‌شود [۳-۵].

ارزیابی خوردگی بین دانه‌ای فولادهای زنگ‌نزن به صورت متداول با استفاده از استاندارد ASTM A2626 صورت می‌پذیرد که روشی کیفی برای ارزیابی رفتار این دسته از فولادها می‌باشد. مشکل اصلی این روش، نیاز به مقدار زیادی فولاد، اچانت و

فولاد زنگ‌نزن دوپلکس (آستنی-فریتی) به دلیل تعادل بین فازها از مقاومت به خوردگی بالا و خواص مکانیکی مطلوبی برخوردار بوده و به طور متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس در اثر عملیات حرارتی یا فرایند جوشکاری در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به دلیل تشکیل کاربید کروم، نیتريد کروم

جدول (۱): ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) برای فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205

کربن	کروم	نیکل	مولیبیدن	مس
۰/۰۲۳	۲۲/۳۰	۵/۴۲	۳/۱۳	۰/۱۷
منگنز	نیتروژن	سیلیسیم	آهن	
۱/۴۷	۰/۱۹	۰/۴۶	Bal.	

آزمون‌های الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات (Autolab3) در محلول ۲ مولار اسید سولفوریک + ۱ مولار اسید کلریدریک" در دمای ۳۰ °C انجام شدند. میله پلاتینی به عنوان الکترود کمکی و الکترود نقره/کلرید نقره به عنوان الکترود مرجع مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش DLEPR مطابق با شرایط پیشنهادی توسط جین لی و همکارانش (Jin Li et. al.) [۵] با نرخ روبش پتانسیل ۱/۶۶ mV/s در محلول مذکور صورت گرفت. آزمون پلاریزاسیون آندی در محدوده‌ی پتانسیل مدار باز تا ۲ V نسبت به پتانسیل مدار باز با نرخ روبش پتانسیل ۱/۶۶ mV/s، انجام شد. آزمون پلاریزاسیون سیکنی نمونه‌ها از OCP شروع گردیده و با نرخ روبش ۱/۶۶ mV/s تا پتانسیل ۱ V نسبت به OCP ادامه یافته و سپس بازگشت داده شدند. آزمون‌های امپدانس الکتروشیمیایی با دامنه پتانسیل ۵ mV و محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز صورت پذیرفت. به منظور تحلیل نتایج حاصل از آزمون‌های الکتروشیمیایی، از نرم‌افزار GPES و FRA مدل ۴,۹ استفاده گردید.

بررسی میکروسکوپی و متالوگرافی نمونه‌ها نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری (Leitz) و میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مدل ۳۶۰ Cambridge انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین درجه حساس شدن

منحنی DLEPR نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن SAF 2205 در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر منحنی شامل روبش آندی از OCP تا پتانسیل ۰/۳۵ V ولت و بازگشت آن به پتانسیل اولیه می‌باشد. نسبت دانسیته جریان

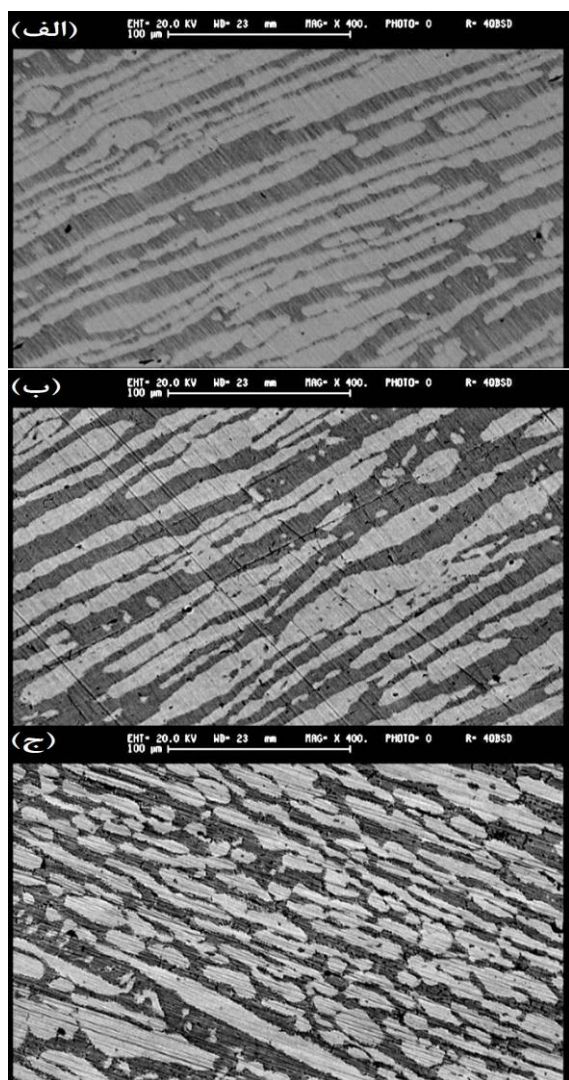
همچنین ناکارآمدی در تشخیص حساس شدن برای فولادهایی با درجه حساس شدن کم می‌باشد [۵-۶]. بنابراین روش‌های کیفی و غیرمخری مانند پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، راکتیواسیون پتانسیوکینتیک الکتروشیمیایی تک حلقه (EPR) و دو حلقه (DLEPR) به منظور بررسی میزان حساس شدن فولادهای زنگ‌نزن پیشنهاد شدند [۷-۱۱]. علاوه بر این، روش‌های نوین دیگری مانند طیف‌سنجی امپدانس موضعی (LIS) و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی دینامیک (DEIS) نیز در خصوص بررسی خوردگی بین‌دانه‌ای فولادهای زنگ‌نزن آستینیتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲-۱۴].

طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، اطلاعات بسیار سودمندی در ارتباط با خصوصیات سطحی و واکنش‌های الکتروشیمیایی مربوط به خوردگی در اختیار قرار می‌دهد. مزایای این روش باعث گردیده که بسیاری از محققان، مقاومت به خوردگی مواد مختلف را با استفاده از این آزمون مورد بررسی قرار دهند [۱۵-۱۹]. بررسی خوردگی بین‌دانه‌ای فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس با استفاده از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی تنها در پتانسیل مدار باز (OCP) بررسی شده است [۲۰]. بنابراین در این پژوهش، پاسخ آزمون امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 با درجات مختلفی از حساس شدن در ناحیه ترانس‌پسیو مورد بررسی قرار گرفته تا میزان خوردگی بین‌دانه‌ای ارزیابی شود.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 با ترکیب شیمیایی که در جدول (۱) نشان داده شده، در ابعاد ۱×۱×۱ سانتیمتر برش زده شدند. نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد آنیل محلولی و سپس به مدت ۱ و ۵ ساعت در دمای ۷۲۵ °C حساس گردیده و کوئنچ شدند. نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سمباده تا زبری ۳۰۰۰ سمباده‌زنی شده و سپس مانت گردیدند.

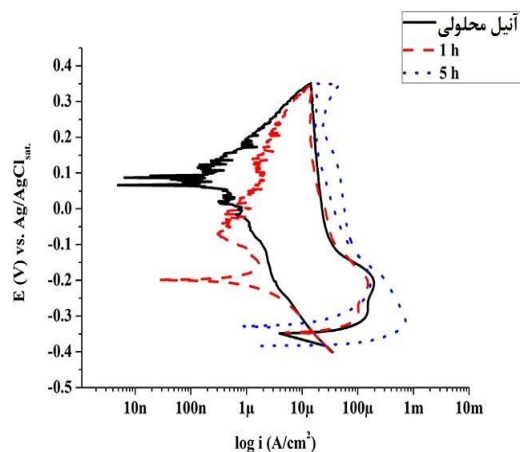
نتایج حاصل از آزمون DLEPR با عکس‌های SEM حاصل از متالوگرافی مطابق با استاندارد ASTM A923 [۲۱] همخوانی دارند (شکل (۲)). بدین صورت که نمونه آنیل محلولی دارای ساختاری بدون تغییر بوده و نمونه با ۵ ساعت حساس شدن دارای ساختاری حساس شده است که در آن، فاز فریت (رنگ تیره) دچار خوردگی در نواحی مرز مشترک با آستنیت (رنگ روشن) و قسمت داخلی فاز شده است.



شکل (۲): تصاویر SEM بر اساس استاندارد ASTM A923 برای نمونه‌های حساس شده در دمای ۷۲۵ °C به مدت: (الف): آنیل محلولی، (ب): ۱ ساعت و (ج): ۵ ساعت

با توجه به نتایج تفرق اشعه ایکس در شکل (۳) می‌توان مشاهده نمود که در اثر حساس شدن نمونه در ۵ ساعت، شدت پیک‌های

راکتیواسیون (Ir) به دانسیته جریان اکتیواسیون (Ia) بر حسب درصد، بیانگر درجه حساس شدن هریک از نمونه‌ها می‌باشد. بر همین اساس، نمونه‌هایی که درجه حساس شدن آنها کمتر از ۱٪ باشد غیر حساس شده و نمونه‌هایی با بیش از ۱٪ را حساس شده در نظر می‌گیرند.



شکل (۱): نمودار DLEPR برای فولاد SAF 2205 با درجات مختلفی از حساس شدن

جدول (۲): درجه حساس شدن نمونه‌های فولاد SAF 2205 با زمان‌های مختلف عملیات حرارتی در ۷۲۵ °C

زمان حساس شدن	آنیل محلولی	۱ ساعت	۵ ساعت
Ir (A/cm ²)	$1/94 \times 10^{-6}$	$1/76 \times 10^{-6}$	$1/47 \times 10^{-6}$
Ia (A/cm ²)	$3/12 \times 10^{-6}$	$1/52 \times 10^{-6}$	$9/47 \times 10^{-6}$
درصد حساس شدن	۰/۶۲	۱/۱۶	۱۵/۵۲

نتایج حاصل از آزمون DLEPR در جدول (۲) آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان عملیات حرارتی، میزان حساس شدن افزایش یافته و نمونه با ۵ ساعت حساس شدن در دمای ۷۲۵ °C بیشترین میزان حساس شدن را دارا می‌باشد. این میزان بالا از حساس شدن به نواحی تخلیه شده از کروم در مرزانه و مجاورت آن مربوط می‌شود.

موضوع به دلیل تشکیل لایه پسیو ناپایدار در اثر عملیات حرارتی حساس شدن می‌باشد [۲۲-۲۳]. علاوه بر این، مشاهده می‌گردد که دانسیته جریان هر سه نمونه در ناحیه ترانس پسیو تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و این ناحیه پتانسیل ۰/۹۵ V شروع می‌شود.

۳-۳- طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

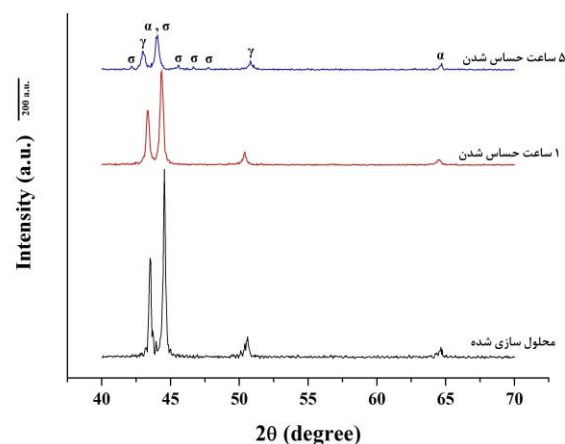
طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی فولاد زنگ‌نزن دوپلکس در پتانسیل‌های مختلفی از ناحیه ترانسپسیو (۰/۹۵ V تا ۱/۲۰ V) با گام پتانسیل ۰/۰۵ V در شکل (۵) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در هر پتانسیل رفتار مشابه با یکدیگر داشته و می‌توان ناحیه ترانس پسیو را به سه قسمت تقسیم نمود:

الف) ناحیه مربوط به پتانسیل ۰/۹۵ V تا ۱/۰۰ V که به دلیل انحلال آندی لایه پسیو تشکیل شده است. نمودار نایکوئیست نمونه‌ها در این منطقه شامل یک نیم‌دایره لهیده با قطر بسیار بزرگ است که بیانگر مقاومت انتقال بار (R_{ct}) است (شکل (۵) - الف، ب).

ب) ناحیه دوم از پتانسیل ۱/۰۰ V تا ۱/۰۵ V بوده و دربرگیرنده یک تک‌حلقه خازنی به همراه یک حلقه القایی در فرکانس‌های کم است. این حلقه القایی در پتانسیل ۱/۰۰ V شروع به تشکیل شده و در پتانسیل ۱/۰۵ V کامل می‌شود (شکل (۵) - ب، ج). تشکیل و تکمیل حلقه القایی به واجذب سطحی (desorption) لایه پسیو در مناطق تخلیه‌شده از کروم در مجاورت مرزخانه‌ها مربوط است [۲۲-۲۳]. بنابراین، می‌توان از R_{ct} در پتانسیل تکمیل حلقه القایی (۱/۰۵ V) به عنوان معیاری برای ارزیابی درجه حساس شدن نمونه‌ها استفاده کرد.

ج) ناحیه سوم از پتانسیل ترانس پسیو از ۱/۰۵ V تا ۱/۲۰ V می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، نمودار نایکوئیست در این ناحیه شامل یک حلقه خازنی به همراه یک حلقه القایی در فرکانس‌های پایین است که با افزایش پتانسیل این حلقه القایی به دو حلقه القایی تقسیم می‌گردد (شکل (۵) - د، ه، و).

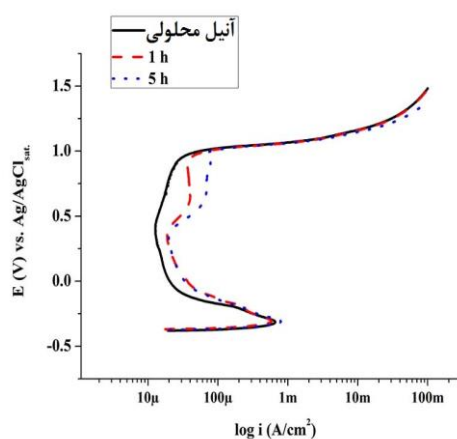
مربوط به فاز فریت کاهش یافته و همزمان، پیک‌های مربوط به فاز سیگما (σ) در نمودار ظاهر شده‌اند. این نتایج نیز مؤید حساس شدن نمونه با افزایش دمای عملیات حرارتی می‌باشد.



شکل (۳): الگوی پراش اشعه ایکس برای فولاد زنگ‌نزن SAF 2205 با درجات مختلفی از حساس شدن شامل فازهای گاما (γ)، آلفا (α) و سیگما (σ)

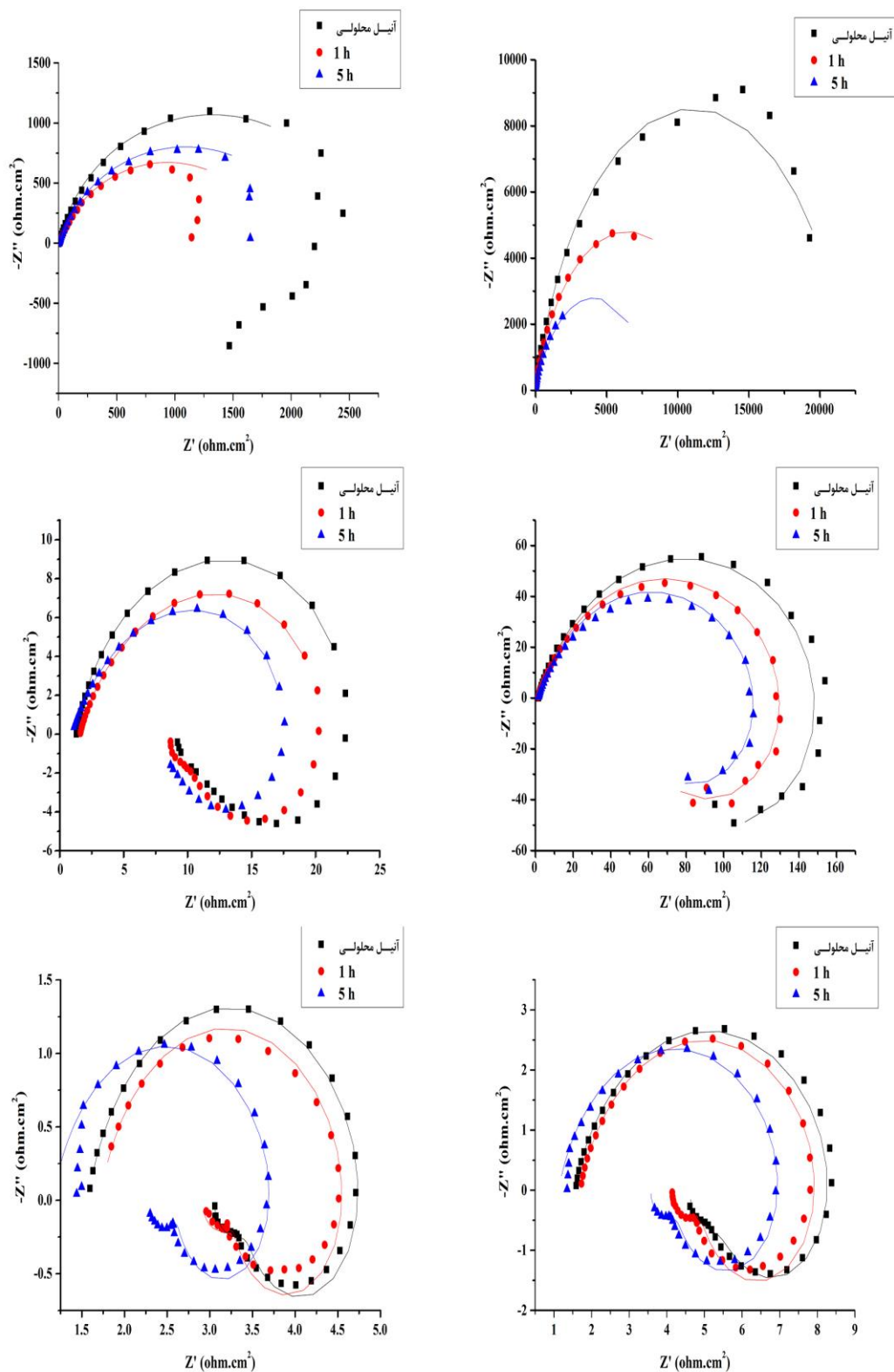
۳-۲- پلاریزاسیون آندی

نمودار پلاریزاسیون آندی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن دوپلکس با درجات مختلفی از حساس شدن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار پلاریزاسیون آندی نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن SAF 2205 با درجات مختلفی از حساس شدن

هر سه نمونه دارای رفتار اکتیو-پسیو بوده و ناحیه ترانس پسیو در پتانسیل‌های بالا قابل مشاهده است. هرچه میزان حساس شدن نمونه بیشتر باشد، دانسیته جریان در ناحیه پسیو بیشتر است که این



شکل (۵): نمودار نایکوئیست فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 با درجات مختلفی از حساس شدن در پتانسیل‌های مختلف برای داده‌های تجربی (نقاط) و نتایج حاصل از فیت توسط مدارهای معادل (خطوط): (الف): ۰/۹۵ ولت، (ب): ۱/۰۰ ولت، (ج): ۱/۰۵ ولت، (د): ۱/۱۰ ولت، (ه): ۱/۱۵ ولت و (و): ۱/۲۰ ولت

تشکیل دهد که دلیل ایجاد حلقه القایی دوم در نمودار نایکوئیست می‌باشد [۲۵].
 نتایج حاصل از طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با توجه به مدارهای معادل شکل (۶)، در جدول (۳) آورده شده است.

تقسیم حلقه القایی به دلیل واجذب‌سطحی لایه پسیو در نواحی تخلیه‌شده از کروم و همچنین جذب سطحی ذرات بر روی لایه پسیو در حال انحلال است [۲۲-۲۶]. کروم شش ظرفیتی در لایه پسیو در غلظت‌هایی بیش از غلظت بحرانی می‌تواند دچار انحلال گردیده و در نتیجه، فیلمی متشکل از CrO_4^{2-} را بر روی سطح

جدول (۳): نتایج طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌ها در پتانسیل آندی مختلف در ناحیه ترانس‌پسیو

							زمان	پتانسیل	
n		$Y_0 (F/cm^2)$		$R_{ct} (\Omega.cm^2)$		$R_s (\Omega.cm^2)$		۰/۹۵	
۰/۸۴		$۰/۱۲۸ \times 10^{-1}$		۲۲۰۳۰		۱/۱۵		ولت	
۰/۸۲		$۰/۱۸۰ \times 10^{-1}$		۱۲۷۳۰		۱/۱۴		۱ ساعت	
۰/۷۸		$۰/۳۱۳ \times 10^{-1}$		۷۹۷۹		۱/۷۶		۵ ساعت	
n		$Y_0 (F/cm^2)$		$R_{ct} (\Omega.cm^2)$		$R_s (\Omega.cm^2)$		۱/۰۰	
۰/۸۹		$۰/۱۸۳ \times 10^{-1}$		۲۵۴۸/۷		۱/۹۴		ولت	
۰/۷۵		$۰/۴۵۵ \times 10^{-1}$		۲۳۶۵/۷		۱/۷۰		۱ ساعت	
۰/۸۱		$۰/۳۱۷ \times 10^{-1}$		۲۱۰۴/۱		۱/۵۳		۵ ساعت	
$L (H.cm^2)$	$R_p (\Omega.cm^2)$		$R_{ct} (\Omega.cm^2)$		n	$Y_0 (F/cm^2)$	$R_s (\Omega.cm^2)$		۱/۰۵
۳۱۶/۴	۹۳/۸		۱۵۸		۰/۷۸	$\times 10^{-1}$ ۰/۴۹۵	۱/۵۵		ولت
۲۹۵/۷	۷۵/۳		۱۳۴/۳		۰/۷۵	$\times 10^{-1}$ ۰/۶۷۸	۱/۵۱		۱ ساعت
۲۱۸/۲	۶۷/۷		۱۲۰/۰		۰/۷۳	$\times 10^{-1}$ ۰/۸۵۸	۱/۶۴		۵ ساعت
n		$Y_0 (F/cm^2)$		$R_{ct} (\Omega.cm^2)$		$R_s (\Omega.cm^2)$		۱/۱۰	
۰/۷۹		$۱/۰۲ \times 10^{-1}$		۲۱/۲		۱/۱۲		ولت	
۰/۷۴		$۱/۲۷ \times 10^{-1}$		۱۹/۷		۱/۷۰		۱ ساعت	
۰/۸۳		$۱/۴۴ \times 10^{-1}$		۱۶/۱		۱/۰۶		۵ ساعت	
$L_2 (H.cm^2)$	$R_2 (\Omega.cm^2)$	$L_1 (H.cm^2)$	$R_1 (\Omega.cm^2)$	$R_t (\Omega.cm^2)$	n	$Y_0 (F/cm^2)$	$R_s (\Omega.cm^2)$		۱/۱۵
۰/۷۲۵	۸/۸۰	۱۲/۳۴	۱۳/۱۵	۷/۲۱	۰/۸۱	$۰/۶۵ \times 10^{-1}$	۱/۵۶		ولت
۰/۴۰۱	۶/۵۷	۱۲/۲۴	۹/۸۱	۶/۵۸	۰/۸۳	$۰/۵۱ \times 10^{-1}$	۱/۶۹		۱ ساعت
۰/۳۸۴	۶/۶۴	۱۱/۲۳	۱۰/۵۲	۶/۲۰	۰/۸۲	$۰/۵۴ \times 10^{-1}$	۱/۱۳		۵ ساعت
$L_2 (H.cm^2)$	$R_2 (\Omega.cm^2)$	$L_1 (H.cm^2)$	$R_1 (\Omega.cm^2)$	$R_t (\Omega.cm^2)$	n	$Y_0 (F/cm^2)$	$R_s (\Omega.cm^2)$		۱/۲۰
۰/۱۳۳	۴/۲۶	۳/۸۶	۷/۲۸	۳/۳۵	۰/۸۱	$۰/۴۸ \times 10^{-1}$	۱/۵۷		ولت
۰/۰۸۳	۳/۲۳	۳/۵۸	۴/۹۶	۲/۹۳	۰/۸۷	$۰/۳۹ \times 10^{-1}$	۱/۷۲		۱ ساعت
۰/۰۶۵	۳/۲۱	۳/۵۲	۴/۷۵	۲/۶۶	۰/۸۶	$۰/۳۸ \times 10^{-1}$	۱/۱۷		۵ ساعت

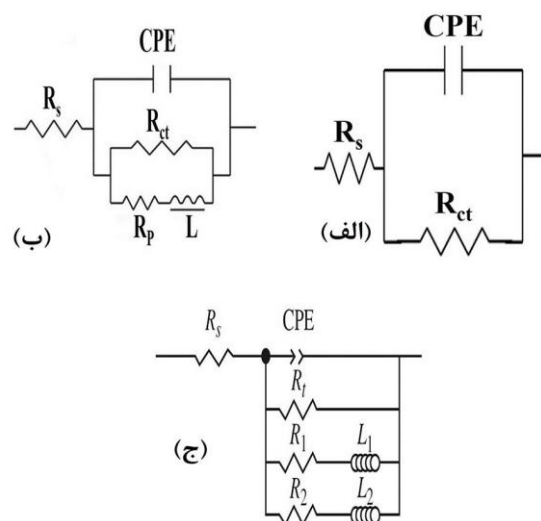
پتانسیل، ناحیه سوم از منطقه ترانس‌سیو ایجاد می‌گردد که از دو حلقه القایی در ادامه حلقه خازنی تشکیل شده است. مقاومت انتقال بار در ناحیه سوم (R_t) با درجه حساس شدن هر نمونه متناسب است.

۴-۳- مطالعات میکروسکوپی

تصاویر میکروسکوپ نوری پس از انجام آزمون EIS در پتانسیل $1/05 V$ و $1/20 V$ در شکل (۷) و شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مرزدهانه‌های غیرپیوسته در مرز فاز فریت (فاز تیره) و فاز آستنیت (فاز روشن) و همچنین در مرز فاز آستنیت با آستنیت برای نمونه آنیل محلولی در پتانسیل $1/05 V$ قابل رؤیت است (شکل (۷) - الف). مرزدهانه‌های با افزایش درجه حساس شدن در این پتانسیل پیوسته شده (شکل (۷) - ب) و مرزدهانه‌های کاملاً پیوسته به همراه حمله خوردگی در فاز فریت برای بیشترین درجه حساس شدن مشاهده می‌شود (شکل (۷) - ج).

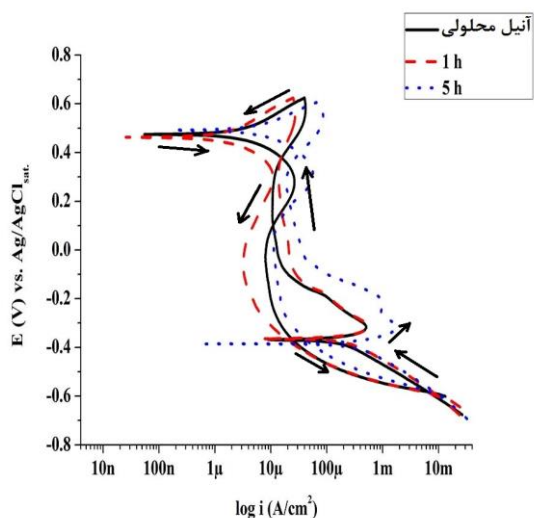
با افزایش پتانسیل به $1/20 V$ ، مرزدهانه‌ها در نمونه غیرحساس به صورت پیوسته مشاهده شده و در نمونه‌های حساس شده، علاوه بر وجود مرزدهانه‌های پیوسته، فاز فریت دچار خوردگی شده که میزان حمله خوردگی به درجه حساس شدن وابسته است (شکل (۸)). هرچه میزان حساس شدن نمونه بیشتر باشد، فاز فریت دچار خوردگی بیشتری گردیده و سیاه‌تر دیده می‌شود. نتایج تصاویر میکروسکوپ نوری در تطابق با EIS است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که بر روی سطح نمونه‌ها حفره‌های وجود ندارد که این موضوع به دلیل وجود حلقه منفی در نمودار پلاریزاسیون سیکلی نمونه‌ها می‌باشد (شکل (۹)).

المان‌های مدار معادل شامل مقاومت محلول (R_s)، مقاومت انتقال بار (R_{ct})، المان فاز ثابت (CPE یا Y_0)، مقاومت پلاریزاسیون (R_p)، المان القاگر (L) می‌باشد. المان‌های R_1 ، R_2 ، L_1 و L_2 در مدار معادل نیز به تقسیم حلقه القایی در ناحیه سوم از پتانسیل ترانس‌سیو مربوط می‌شود.



شکل (۶): مدار معادل به منظور استخراج داده‌های نمودار نایکوئیست در نواحی مختلف از پتانسیل‌های آندی ترانس‌سیو: (الف): ناحیه اول، (ب): ناحیه دوم و (ج): ناحیه سوم

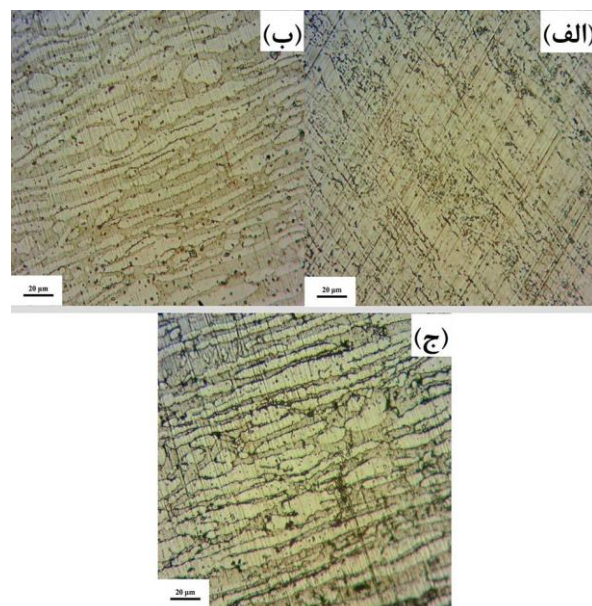
با توجه به جدول (۳)، مقاومت انتقال بار در ناحیه مربوط به انحلال آندی لایه پسیو (ناحیه اول) بسیار بالا می‌باشد، زیرا لایه پسیو یکنواختی بر روی سطح وجود دارد. با این وجود، نمونه با درجه حساس شدن بیشتر، مقاومت انتقال بار کمتری از خود نشان می‌دهد که با مطالعات پیشین مطابقت دارد [۲۲-۲۴]. با افزایش پتانسیل آندی در ناحیه ترانس‌سیو، حلقه القایی در ادامه حلقه خازنی تشکیل گردیده که به خوردگی بین‌دانه‌ای در نواحی تخلیه شده از کروم مرتبط است. هرچه میزان درجه حساس شدن نمونه بیشتر باشد، مقاومت انتقال بار و مقاومت پلاریزاسیون آن کمتر است. بنابراین از مقادیر R_p و R_{ct} در پتانسیل $1/05 V$ می‌توان به عنوان معیاری برای ارزیابی درجه حساس شدن فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 استفاده کرد. با افزایش بیشتر



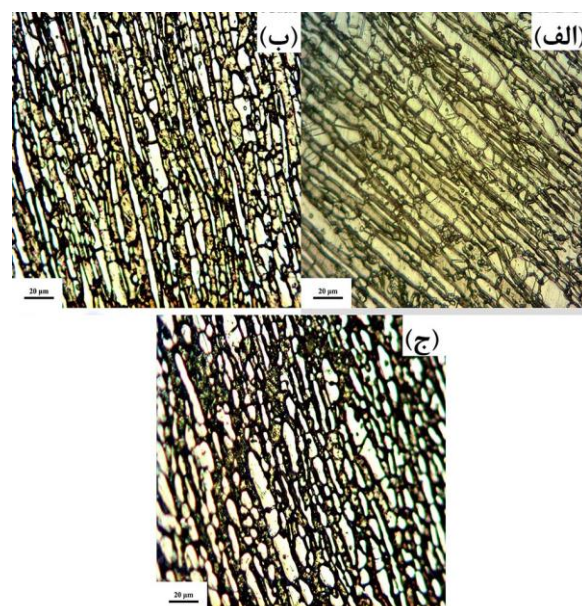
شکل (۹): نمودار پلاریزاسیون سیکی برای نمونه‌های حساس شده فولاد زنگ‌نزن SAF 2205

۴- نتیجه گیری

نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن دوپلکس SAF 2205 به مدت ۱ و ۵ ساعت در دمای 725°C حساس شدند تا رفتار خوردگی آنها با استفاده از آزمون DLEPR، پلاریزاسیون آنودی و EIS مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به نتایج آزمون DLEPR، درجه حساس شدن تابعی از زمان عملیات حرارتی بوده و نمونه با ۵ ساعت حساس شدن، بیشترین مقدار حساس شدن را به خود اختصاص داده است. آزمون پلاریزاسیون آنودی حاکی از دانسیته جریان پسیو بالاتر برای نمونه با حساس شدن بیشتر بود که دلیل آن ناپایداری لایه پسیو در این ناحیه می‌باشد. با انجام آزمون EIS در منطقه ترانس‌پسیو، سه منطقه مجزا از یکدیگر قابل شناسایی بوده که شامل: انحلال آنودی لایه پسیو، واجذب سطحی لایه پسیو در نواحی تخلیه شده از کروم و تشکیل لایه سطحی بر روی سطح می‌باشند. علاوه بر این، در ناحیه دوم از منطقه ترانس‌پسیو، حلقه القایی در پتانسیل $1/05\text{ V}$ تکمیل می‌شود که R_p و R_{ct} در این پتانسیل معیاری از درجه حساس شدن نمونه‌ها هستند، بدین صورت که هرچه این مقاومت‌ها بیشتر باشند، درجه حساس شدن کمتر است.



شکل (۷): تصویر میکروسکوپ نوری پس از EIS در پتانسیل $1/05\text{ V}$ برای نمونه: (الف): آنیل محلولی، (ب): ۱ ساعت و (ج): ۵ ساعت حساس شدن



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ نوری پس از EIS در پتانسیل $1/20\text{ V}$ برای نمونه: (الف): آنیل محلولی، (ب): ۱ ساعت و (ج): ۵ ساعت حساس شدن

Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 35A, pp. 3499-3513, 2004.

[9] G. H. Aydogdu & M. K. Aydinol, "Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel", Corrosion Science, Vol. 48, pp. 3565-3583, 2006.

[10] B. Deng, Y. Jiang, J. Xu, T. Sun, J. Gao, L. Zhang, W. Zhang and J. Li, "Application of the modified electrochemical potentiodynamic reactivation method to detect susceptibility to intergranular corrosion of a newly developed lean duplex stainless steel LDX2101", Corrosion Science, Vol. 52 pp. 969-977, 2010.

[11] M. E. Arıkan, R. Arıkan & M. Doruk, "Determination of Susceptibility to Intergranular Corrosion of UNS 31803 Type Duplex Stainless Steel by Electrochemical Reactivation Method", International Journal of Corrosion, Vol. Article ID 651829, 2012.

[12] A. Arutunow & K. Darowicki, "DEIS evaluation of the relative effective surface area of AISI 304 stainless steel dissolution process in conditions of intergranular corrosion", Electrochimica Acta, Vol. 54, pp. 1034-1041, 2009.

[13] A. Arutunow, K. Darowicki & A. Z. ski, "Atomic force microscopy based approach to local impedance measurements of grain interiors and grain boundaries of sensitized AISI 304 stainless steel", Electrochimica Acta, Vol. 56, pp. 2372-2377, 2011.

[14] K. Morshed Behbahani, M. Pakshir & S. Matin, Advanced Processes in Materials, Vol. 8, pp. 61-71, 2014.

[15] Z. J. Jia, C. W. Du, C. T. Li, Z. Yi & X. G. Li, "Study on pitting process of 316L stainless steel by means of staircase potential electrochemical impedance spectroscopy", International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol. 18, pp. 48-52, 2011.

[16] J. Hou, G. Zhu, J. Xu & H. Liu, "Anticorrosion Performance of Epoxy Coatings Containing Small Amount of Inherently Conducting PEDOT/PSS on Hull Steel in Seawater", Journal of Materials Science & Technology, Vol. 29, pp. 678-684, 2013.

تصاویر میکروسکوپ نوری در پتانسیل ۱/۰۵ V و ۱/۲۰ V نتایج حاصل از آزمون EIS را تأیید نموده و بیانگر خوردگی شدید در مرزخانه‌ها برای نمونه حساس شده بوده و در پتانسیل‌های بالا فاز فریت دچار خوردگی شدیدی شده است.

۵- منابع

[1] A. I. Munoz, J. G. A. Anton, J. L. Guinon & V. P. R. Herranz, "Inhibition effect of chromate on the passivation and pitting corrosion of a duplex stainless steel in LiBr solutions using electrochemical techniques", Corrosion Science, Vol. 49, pp. 3200-3225, 2007.

[2] H. Sieurin, E. M. Westin, M. Liljas & R. Sandström, "Fracture Toughness of Welded Commercial Lean Duplex Stainless STEELS", Welding in the World, Vol. 53, pp. R24-R33, 2009.

[3] K. Ravindranath & S. N. Malhotra, "The Influence of Aging on The Intergranular Corrosion OF 22 Chromium-5 Nickel Duplex Stainless STEEL", Corrosion Science, Vol. 37, pp. 121-132, 1995.

[4] K. L. Weng, H. R. Chen & J. R. Yang, "The low-temperature aging embrittlement in a 2205 duplex stainless steel", Materials Science and Engineering, Vol. 379A, pp. 119-132, 2004.

[5] J. Gong, Y. M. Jiang, B. Deng, J. L. Xu, J. P. Hu & J. Li, "Evaluation of intergranular corrosion susceptibility of UNS S31803 duplex stainless steel with an optimized double loop electrochemical potentiokinetic reactivation method", Electrochimica Acta, Vol. 55 pp. 5077-5083, 2010.

[6] "Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels", ASTM International, 2002.

[7] "Standard Test Method for Electrochemical Reactivation (EPR) for Detecting Sensitization of AISI Type 304 and 304L Stainless Steels", ASTM international, 1999.

[8] T. Amadou, C. Braham & H. Sidhom, "Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation Test Optimization in Checking of Duplex Stainless Steel Intergranular Corrosion Susceptibility",

- Response of 316L and 316 SS in Transpassive Region”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, pp. 2283-2292, 2014.
- [23] K. Morshed Behbahani, M. Pakshir, Z. Abbasi & P. Najafisayar, “Damage mechanism at different transpassive potentials of solution-annealed 316 and 316l stainless steels”, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 22, pp. 45-51, 2015.
- [24] C. A. Huang, Y. Z. Chang & S. Chen, “The electrochemical behavior of austenitic stainless steel with different degrees of sensitization in the transpassive potential region in 1 MH 2 SO 4 containing chloride”, *Corrosion science*, Vol. 46, pp. 1501-1513, 2004.
- [25] H. Duan, Y. Li & C. Yan, “Electrochemical repairing of pitted 18-8 stainless steel”, *Journal of Material Science*, Vol. 40, pp. 2911-2917, 2005.
- [26] M. Maleeva, A. Rybkina, A. Marshakov & V. Elkin, “The effect of atomic hydrogen on the anodic dissolution of iron in a sulfate electrolyte studied with impedance spectroscopy”, *Protection of Metals*, Vol. 44, pp. 548-556, 2008.
- [17] S. M. Bhola, S. Kundu, R. Bhola, B. Mishra & S. Chatterjee, “Electrochemical Study of Diffusion Bonded Joints between Micro-duplex Stainless Steel and Ti6Al4V Alloy”, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 30, pp. 163-171, 2014.
- [18] R. K. Gupta, K. Mensah-Darkwa & D. Kumar, “Corrosion Protective Conversion Coatings on Magnesium Disks Using a Hydrothermal Technique”, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 30, pp. 47-53, 2014.
- [19] M. Pakshir, R. Medhat & K. Morshed Behbahani, *Advanced Processes in Materials*, Vol. 9, pp. 1-8, 2015.
- [20] R. Chaves, I. Costa, H. G. D. Melo & S. Wolyneć, “Evaluation of selective corrosion in UNS S31803 duplex stainless steel with electrochemical impedance spectroscopy”, *Electrochimica Acta*, Vol. 51, pp. 1842-1846, 2006.
- [21] “Standard Test Methods for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels”, *ASTM International*, 2003.
- [22] K. Morshed Behbahani & M. Pakshir, “Effect of Different Degrees of Sensitization on the EIS