

## بررسی تاثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خوردگی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی 2205

محمدعلی ترحم نژاد<sup>۱\*</sup>، رضا دهملائی<sup>۲</sup> و صادق معینی فر<sup>۳</sup>

### چکیده

فولادهای زنگ نزن دوفازی به دلیل ویژگی‌های مکانیکی مناسب و مقاومت به خوردگی بالا در صنایع شیمیایی، نفت و گاز، پتروشیمی و پالایشگاه کاربردی بسیار متنوع پیدا کرده‌اند. در این پژوهش، نرخ خوردگی و ویژگی‌های مکانیکی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی نوع 2205 با چهار حرارت ورودی گوناگون (0.86، 0.91، 1.02، 1.12 kJ/mm) بررسی شد. جوشکاری آلیاژ با فرآیند GTAW و قطبیت منفی انجام شده است. مقاومت به خوردگی فلزات جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) همه اتصالات به روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک سیکلی و با استفاده از محلول 3.5 درصد کلرید سدیم در دمای اتاق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که برای حرارت ورودی (0.86، 0.91، 1.02، 1.12 kJ/mm) نرخ خوردگی برای فلز جوش به ترتیب (0.034، 0.009، 0.004، 0.230 mm/yr) است. هم‌چنین، کاهش حرارت ورودی باعث افزایش درصد حجمی فریت در فلز جوش نمونه‌ها شده که بررسی تاثیرات این عامل بر نرخ خوردگی و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها، تطابق روند نتایج تجربی این پژوهش با نتایج تئوری را نشان داد. نمونه 1 با داشتن بیش‌ترین حرارت ورودی، دارای بیش‌ترین نرخ خوردگی است. نتایج این پژوهش هم‌چنین، نشان دادند که نمونه 2 با داشتن حرارت ورودی 1.02 kJ/mm، شرایط بهینه‌ای از نظر کاهش نرخ خوردگی، هم‌چنین حصول ویژگی‌های مکانیکی مطلوب برای جوشکاری فولاد دوفازی 2205 را ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن دوفازی، حرارت ورودی، درصد حجمی فریت، نرخ خوردگی، ویژگی‌های مکانیکی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، خوزستان، ایران.

۲- استادیار و عضو هیئت علمی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

\*-نویسنده مسئول مقاله: m\_tarahom@yahoo.com

## پیشگفتار

فولادهای زنگ نزن دوفازی آلیاژهایی بر پایه آهن، کرم و نیکل هستند که دارای دوفاز آستنیت و فریت بوده، بنابراین، ویژگی‌های مفید هر دو نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی نظیر استحکام کششی و خستگی بالا، چقرمگی خوب حتی در دمای پایین، شکل پذیری و جوش پذیری مناسب و مقاومت عالی در برابر خوردگی تنش، حفره‌ای و یکنواخت را دارا هستند [۱]. استفاده از این فولادها به دلیل نیاز روز افزون صنایع گوناگون به مواد با مقاومت بالا در محیط‌های بسیار خورنده، افزایش و توسعه یافته‌اند [۲ و ۳]. مقدار حرارت ورودی در حین جوشکاری فولادهای دوفازی از جمله فولاد 2205 جهت رسیدن به ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و مقاومت به خوردگی در محدوده 0.5-2.5 kJ/mm ذکر شده است [۴ و ۳]. به گونه معمول، مقاومت به خوردگی فولادهای دوفازی، نشان دهنده مقدار خوردگی این فولاد در محیط‌های خورنده کلراید و فلراید می‌باشد [۵]. روش‌های الکتروشیمیایی امکانی مناسب را برای پیش‌بینی یا بررسی سریع خوردگی این آلیاژها فراهم کرده است. از میان این روش‌ها، روش‌های پتانسیودینامیک و پتانسیواستاتیک دارای اهمیت بسیار هستند. در این روش، با استفاده از منحنی‌های پلاریزاسیون به راحتی می‌توان داده‌های سینتیکی الکتروود را به روش گرافیکی نشان داد. این منحنی‌ها بر اساس قوانین فارادی [۶] بدست می‌آیند و در توصیف و توضیح بسیاری از پدیده‌های خوردگی مفیدند. بررسی تاثیر حرارت ورودی بر جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 به روش قوس تنگستن-گاز بر ریزساختار و مقاومت به خوردگی فلز جوش بررسی و مقایسه آن با فلز پایه انجام شده است [۷]. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فلز جوش با افزایش حرارت ورودی نسبت به فلز پایه فعال‌تر شده و پتانسیل خوردگی کم‌تری از خود نشان می‌دهد. با این حال، فلز جوش دارای چگالی جریان روئین شدن کم‌تری نسبت به فلز پایه است. این نشان دهنده مقاومت به خوردگی بالاتر فلز جوش نسبت به فلز پایه است. صادقان خشویی، رفتار خوردگی مقاطع جوش نامشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L را با

استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و دو نوع فلز پرکننده ER25104L و ER309LMo مورد بررسی قرار داد [۸]. در این پژوهش، کنترل حرارت ورودی و تعیین فلز پرکننده مناسب برای جلوگیری و کاهش میزان خوردگی موثر تشخیص داده شده است. همچنین، نتایج بدست آمده از آزمون‌های الکتروشیمیایی نیز نشان دادند که فلز پایه سوپر دوفازی 32750 در مقایسه با فلز پایه آستنیتی 304L مقاومت به خوردگی بهتری دارد.

در پژوهش پیش رو، جوشکاری به روش قوس تنگستن-گاز روی فولاد زنگ‌نزن دوفازی 2205 با چهار حرارت ورودی گوناگون در محدوده 0.5-2.5 kJ/mm انجام خواهد شد. سپس اثرات میزان حرارت ورودی بر خوردگی اتصالات جوش در ناحیه متأثر از حرارت و فلزات جوش را با استفاده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک سیکلی و اندازه‌گیری سرعت خوردگی بررسی می‌شود. در ضمن، مقدار بهینه حرارت ورودی از نظر مقاومت به خوردگی حفره‌ای در جوشکاری فولاد ذکر شده نیز تعیین شده است.

## مواد و روش پژوهش

در این پژوهش از فولاد زنگ نزن دوفازی 2205-تهیه شده از مفتولی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر- به‌عنوان فلز پایه استفاده شد. آنالیز شیمیایی این فولاد و سیم جوش مصرفی برحسب در صد وزنی، به روش کوانتومتری با دستگاه PMI Master pro 13M0014 optiknr تعیین گردید که نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. سپس نمونه‌هایی از فلز پایه به ضخامت ۱۰ میلی‌متر جدا و از وسط نصف و با استفاده از دستگاه فرز به صورت جناغی یک سویه با زاویه ۳۵ درجه پخ زده و به‌طور ۴ جفت دوتایی آماده مرحله جوشکاری شدند. شماتیک طرح اتصال در شکل ۱ نشان داده شده است. جوشکاری نمونه‌ها با روش GTAW-DCEN به صورت دستی و با طرح اتصال V شکل به صورت لب‌به‌لب بر اساس استاندارد B16.9 ASME انجام شد. از سیم جوش ER2209 با قطر ۲ میلی‌متر برای فلز پرکننده و از گاز آرگون با خلوص صنعتی، با دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز محافظ استفاده شد. الکتروود مصرف نشدنی مورد استفاده، از

پتانسیودینامیک سیکلی، ۴ نمونه به ابعاد  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  از محل اتصال جوش بریده و پس از اتصال سیم مسی به صورت سرد مانت شدند. نمونه‌ها به صورت تر با سمباده‌های شماره ۶۰ تا ۱۲۰۰ سمباده‌زنی شدند. برای جلوگیری از وقوع خوردگی شیاری در فصل مشترک نمونه و مانت، به مدت یک ساعت پیش‌پسیو آن‌ها در اسید کلریدریک ۲۰٪ به همراه کینولین در دمای  $27^\circ\text{C}$  انجام گردید. بار دیگر نمونه‌ها با سمباده ۱۲۰۰ سمباده زده و با الکل چربی‌زدایی شدند. سپس با آب مقطر شسته و سرانجام با قرار گرفتن در هوای گرم، خشک شدند. مابقی سطح نمونه‌ها به جز قسمت مورد آزمایش لاک زده و در بخش داخلی سل مخصوص قرار داده شدند. سل الکتروشیمیایی بکار رفته، یک بشر  $250 \text{ ml}$  درب باز بوده که در حدود  $200-150 \text{ ml}$  محلول  $3/5$  درصد کلرید سدیم برای هر آزمون استفاده شد. دمای مورد ارزیابی  $25^\circ\text{C}$  می‌باشد. آزمون‌های پلاریزاسیون سیکلی و امپدانس بر اساس سیستم سه الکترودی بنا شده است. اندازه‌گیری‌ها به وسیله دستگاه پتانسیواستات Autolab مدل 302N به همراه رسیپانسر جریان متناوب صورت گرفت. برای الکتروود مرجع نوع کالومل اشباع (SCE) و برای الکتروود خنثی، سیم پلاتین استفاده شده است. تمام پتانسیل‌های نتایج ارایه شده نسبت به الکتروود مرجع کالومل است. پس از قرارگیری الکتروودهای مرجع و پلاتین داخل سل، ابتدا دستگاه را کالیبره کرده و سیم‌ها به الکتروود وصل شدند. محلول  $3/5$  درصد کلرید سدیم را در داخل سل ریخته و سپس پتانسیل مدار باز اندازه‌گیری شده و منحنی پلاریزاسیون با شرایط داده شده رسم می‌شوند. در آزمون‌های پلاریزاسیون پس از رها کردن نمونه‌ها به مدت تقریباً ۳۰ دقیقه برای پایدار شدن پتانسیل خوردگی، نمونه‌های از مقدار  $250 \text{ mV}$  زیر پتانسیل مدار باز با نرخ روبش  $1 \text{ mV/s}$  پلاریزه شدند. شرایط داده شده  $3/6$  ولت بر ساعت و محور پتانسیل  $10/6$  میلی متر بر ولت می‌باشد. تست در پتانسیل مدار باز (OCP) از محدوده منفی  $250$  تا مثبت  $1300$  انجام شد. جهت انجام آزمون‌های EIS محدوده‌ی فرکانس از  $10 \text{ mHz}$  تا  $100 \text{ kHz}$  انتخاب و این آزمون در پتانسیل مدار باز با دامنه پتانسیل  $10 \text{ mV}$  انجام گرفت. شماتیک دستگاه

جنس الکتروود تنگستنی حاوی ۲ درصد توریم و به قطر  $2/4$  میلی متر بود. برای هر پاس جوش مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه زیر حرارت ورودی (kJ/mm) محاسبه شد [۹].

(۱) حرارت ورودی

$$H.I = \eta \times \frac{I \times V \times 60}{S \times 1000}$$

در این رابطه  $\eta$  بازده قوس (که  $0/7$  در نظر گرفته شد)،  $I$  شدت جریان (آمپر)،  $V$  ولتاژ (ولت) و  $S$  سرعت جوشکاری (میلی متر بر دقیقه) می‌باشد. پاس‌های جوشکاری برای نمونه ۱ به تعداد ۸ پاس و برای ۳ نمونه دیگر ۷ پاس بود. بر اساس میانگین پارامترهای حین پاس‌های گوناگون جوشکاری، میانگین حرارت ورودی برای هر نمونه محاسبه گردید که نتایج آن‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. امروزه پیش‌بینی ساختار فلز جوش و عدد فریت برای فولادهای زنگ نزن دوفازی و آستنیتی با استفاده از دیگرام‌هایی مانند WRC-1992 انجام می‌شود [۱۰ و ۱۱]. برای استفاده از این نمودار باید مقادیر  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  را محاسبه کرد تا از راه آن‌ها پیش‌بینی ساختار فلز جوش امکان‌پذیر شود. کرم معادل و نیکل معادل از روابط زیر بدست می‌آیند [۱۰].

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad (2)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (3)$$

به‌گونه عملی، برای اندازه‌گیری عدد فریت در محل فلز جوش نمونه‌ها از دستگاه فریت اسکوپ Fischer مدل MP30 استفاده شد. برای آلیاژهای دوفازی ضریب تبدیل عدد فریت به درصد حجمی تقریباً ۷۰ درصد در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. در این پژوهش برای تعیین درصد حجمی فریت افزون بر دو روش بالا، از نرم افزار Clemex Vision نیز استفاده شده است. این نرم افزار برای آنالیز تصاویر، توانمندی‌های بسیار زیادی دارد و در رشته‌هایی مانند علوم آزمایشگاهی، پزشکی و متالوگرافی که با میکروسکوپ و عکس سروکار داشته، بکار می‌رود. از کاربردهای این نرم افزار می‌توان برای تعیین میزان سطح یا حجمی که به وسیله یک یا چند فاز اشغال شده، محاسبه اندازه دانه‌ها و فاصله ذرات اشاره کرد. برای انجام آزمایش‌های خوردگی به روش پلاریزاسیون

گردید. به گونه مشابه ۲ نقطه پتانسیل در محدوده ۲۵۰ میلی ولت پایین پتانسیل مدار باز، روی منحنی کاتدی انتخاب شد و خط کاتدی رسم گردید، هم‌چنین، شیب خطوط آندی و کاتدی بدست آمدند. از محل تقاطع این خطوط پتانسیل خوردگی در محاسبات، جریان خوردگی، نرخ خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون بدست آمدند که نتایج بدست آمده در جدول ۳ درج شده‌اند. در منطقه شروع منحنی مطابق با انحلال آندی نمونه فولاد دوفازی همراه با افزایش نسبتاً کم پتانسیل آن است. هنگامی که جریان به مقدار معینی می‌رسد، آن را شدت جریان بحرانی می‌نامند. در این حالت، شدت جریان بیش‌ترین مقدار را به خود می‌گیرد که نشان دهنده روئین شدن نمونه (منطقه روئین) است. هنگامی که جریان به‌گونه سریع و ناگهانی کاهش یابد تا به مقدار بسیار کمی برسد، افزایش بعدی پتانسیل روی شدت جریان موثر نبوده، ولی همراه با افزایش ضخامت فیلم اکسید می‌باشد. در پتانسیل‌های بالاتر ممکن است اکسیژن متصاعد گردد. این در صورتی است که فیلم اکسید دارای خاصیت هدایت الکترونی باشد. در این ناحیه، مرحله انتقالی آغاز می‌شود به گونه‌ای که بخشی از فیلم اکسید دوباره حل شده و در نتیجه، مقدار خوردگی افزایش می‌یابد. افزایش پتانسیل می‌تواند ناشی از تغییر غلظت و دمای الکترولیت و دیگر عوامل محیطی باشد.

#### ۲- تحلیل منحنی پلاریزاسیون نمونه‌ها

با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون شکل ۳ و داده‌های جدول ۳، پتانسیل مدار باز در ناحیه فلزات جوش نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب  $-0/528$ ،  $-0/084$ ،  $-0/129$  و  $-0/172$  (ولت) است. نرخ خوردگی برای این نمونه‌ها نیز به ترتیب  $0/230$ ،  $0/004$ ،  $0/009$  و  $0/034$  (mm/yr) می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهند که نمونه ۱ و ۲ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار نرخ خوردگی در این ناحیه است. به گونه مشابه بر اساس منحنی‌های پلاریزاسیون شکل ۴ و داده‌های جدول ۳، مشاهده می‌شود که پتانسیل مدار باز در HAZ اتصال نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب  $-0/545$ ،  $-0/036$ ،  $-0/225$  و  $-0/255$  (ولت) است. نرخ خوردگی برای این

پتانسیواستات مورد استفاده در آزمایش‌های خوردگی همراه با سل الکتروشیمیایی در شکل ۲ نشان داده شده است. آزمایش خوردگی برای نمونه‌ها در قسمت‌های فلزات جوش و ناحیه متأثر از حرارت انجام شده‌اند. ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده با انجام آزمایش ضربه شاریپی، بر اساس الزامات استانداردهای AWS B4.0 و ASME SEC. IX انجام گرفت [۹ و ۱۲]. برای انجام این آزمایش از هر ۴ اتصال جوشکاری شده ۳ نمونه به ابعاد  $10 \times 10 \times 55 \text{mm}^3$  بر اساس استانداردهای ذکر شده، تهیه گردید. این آزمایش در دمای  $27^\circ\text{C}$  با دستگاه مدل Controlab انجام و میانگین نتایج آزمایش نیز برای هر اتصال محاسبه شد. آزمایش‌های ماکرو و میکرو سختی سنجی روی محل جوش، HAZ و فلز پایه نمونه‌ها انجام و داده‌های آن‌ها ثبت شد. بررسی ریز ساختار فلز پایه، جوش و HAZ نمونه‌ها پس از اچ شدن با محلول گلیسرژیا [۱۰ و ۱۳] به وسیله میکروسکوپ نوری مدل MEIJI TECHNO انجام شده‌اند.

### نتایج و بحث

#### الف) بررسی وضعیت خوردگی نمونه‌ها

##### ۱- رسم منحنی‌های پلاریزاسیون

بر اساس روشی که گفته شد، با استفاده از دستگاه پتانسیواستات Autolab منحنی‌های پلاریزاسیون سیکی برای ۴ نمونه اتصال با میانگین حرارت ورودی  $0/86$ ،  $0/91$ ،  $1/02$ ،  $1/12 \text{kJ/mm}^2$  مربوط به نواحی گوناگون فلزات جوش و منطقه متأثر از حرارت رسم شده که به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این منحنی‌ها شامل دو بخش است. بخش بالایی واکنش آندی و بخش پایینی واکنش کاتدی است. داده‌هایی همچون پتانسیل خوردگی، جریان خوردگی، نرخ خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون از محل تقاطع خطوط آندی و کاتدی رسم شده روی منحنی‌های واکنش‌های آندی و کاتدی بدست می‌آیند. برای این کار ابتدا با استفاده از این منحنی‌ها، ۲ نقطه پتانسیل در محدوده ۲۵۰ میلی ولت بالای پتانسیل مدار باز، روی منحنی آندی انتخاب و خط آندی رسم

نمونه‌ها نیز به ترتیب ۰/۲۶۰، ۰/۰۰۶، ۰/۰۹۱ و ۰/۱۴۰ (mm/yr) می‌باشد. این نشان می‌دهد که نمونه ۱ و ۲ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نرخ خوردگی در ناحیه HAZ می‌باشند. شکل ۵ مقایسه نرخ خوردگی در نواحی فلز جوش و HAZ نمونه‌هاست. این شکل نشان می‌دهد که نرخ خوردگی در HAZ نمونه‌ها از ناحیه فلزات جوش آن‌ها بیش‌تر بوده، هم‌چنین، نمونه‌های ۱ و ۲ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار نرخ خوردگی در نواحی یاد شده می‌باشند. در ادامه به برخی از دلایل بروز این نتایج اشاره شده است.

**ب) تحلیل نتایج وضعیت خوردگی نمونه‌ها**

در فولادهای دوفازی، تشکیل آستنیت ثانویه بیش‌تر در فلز جوش و HAZ طی جوشکاری چند پاسه رایج است. این عامل می‌تواند به گونه‌ای موثر تعادل فریت-آستنیت ریزساختار را تغییر دهد [۱۰ و ۱۳]. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد حضور آستنیت ثانویه مقاومت به خوردگی حفره‌ای را کاهش می‌دهد زیرا جوانه زنی حفره ترجیحاً در فصل مشترک فریت - آستنیت ثانویه انجام می‌گیرد [۱۴]. نسبت فریت به آستنیت در فلز جوش بستگی به دو عامل ترکیب شیمیایی فلز جوش و سرعت سرد شدن دارد. سرعت سرد شدن وابسته به هدایت حرارتی فلز و مقدار حرارت ورودی در حین جوشکاری بوده و افزایش حرارت ورودی باعث کاهش سرعت سرد شدن می‌شود که نتیجه آن افزایش زمان تشکیل آستنیت به فریت است [۱۵]. تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فلز جوش ناشی از فلز پرکننده ER2209 در شکل ۶ نشان می‌دهد که برای نمونه‌های جوشکاری شده ساختار متشکل از فاز فریت (زمینه)، آستنیت (برجسته) بوده و نسبت فاز فریت به فاز آستنیت از نمونه‌های ۱ تا ۴ روند افزایشی دارد. با توجه به اهمیت نسبت فریت به آستنیت در فلز جوش، در شکل ۷ مقادیر اندازه‌گیری میزان فریت فلز جوش به سه روش گوناگون با استفاده از دستگاه فریت اسکوپ، دیاگرام WRC-1992 و نرم افزاری Clemex انجام شده است. نتیجه شکل ذکر شده برای نمونه‌های ۱ تا ۴ در هر سه روش بیانگر روند افزایش مقدار فریت با کاهش میانگین حرارت ورودی نمونه‌هاست. برای

فولادهای دوفازی به گونه معمول مقدار فریت مطلوب در فلز جوش و فلز پایه در محدوده ۳۰ تا ۶۵ و برای HAZ بین ۳۰ تا ۷۰ درصد حجمی بوده، ولی نتایج برخی از پژوهشگران مقدار بهینه فریت را در محدوده ۳۵ تا ۶۵ درصد معرفی کرده‌اند [۱۶ و ۱۷]. با توجه به مطالب گفته شده برای نمونه ۱ که دارای بیش‌ترین حرارت ورودی بوده، تشکیل آستنیت ثانویه به مقدار بیش‌تر باعث افزایش نرخ خوردگی حفره‌ای در فلز جوش و HAZ آن شده است. نمونه ۲ با داشتن شرایط مطلوب همچون نسبت فاز فریت به فاز آستنیت و سرعت سرد شدن مناسب را می‌توان از جمله دلایل کاهش نرخ خوردگی برای این نمونه برشمرد. فولادهای زنگ نزن دو فازی دارای مقدار نیتروژن بین ۰/۳۵-۰/۰۸ درصد وزنی بوده که جهت بهبود استحکام و مقاومت به خوردگی حفره‌ای آن‌ها بکار می‌رود [۹]. هم‌چنین، اگر مقدار فریت در فلز جوش و HAZ در شرایط سرد کردن سریع، زیاد شود، یک واکنش شدید رسوب گذاری نیتريد در طی سرد شدن رخ می‌دهد زیرا از حد حلالیت فریت (در حدود  $1000^{\circ}\text{C}$ ) عبور کرده و نیتروژن زمان کافی برای جدا سازی در آستنیت نداشته که نتایج این رسوب گذاری شدید مشابه تاثیر آن در آلیاژهای فریتی به گونه شاین توجهی، کم شدن انعطاف پذیری، چقرمگی و مقاومت به خوردگی در فولادهای دوفازی است [۱۰]. برای فولادهای دوفازی نتایج تئوری تاثیر افزایش درصد فریت بر نرخ خوردگی در محیط آبی حاوی کلراید و انرژي ضربه در شکل ۸ نشان داده شده است [۱۶]. پروفیل میکرو سختی و نتایج ماکرو سختی از فلز جوش تا فلز پایه از قسمت سطح مقطع اتصال جوش نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در دو روش بالا همان‌گونه که از شکل‌های ذکر شده مشاهده می‌شود، در همه نمونه‌ها اعداد سختی از مرکز جوش تا HAZ و فلز پایه کاهش یافته به‌گونه‌ای که کاهش این روند در نمونه‌ها تقریباً ثابت است. میانگین سختی فلز پایه حدود ۲۴۵ ویکرز بدست آمد. شکل ۱۱، تصاویر میکروسکوپ نوری را از فصل مشترک فلز پایه و فلز جوش برای نمونه اتصال ۱ تا ۴ که به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی ۱/۱۲، ۱/۰۲، ۰/۹۱ و ۰/۸۶ می‌باشند، نشان می‌دهد. با مقایسه ظاهری این

آن‌ها مشهود است. رسوب آستنیت ثانویه می‌تواند به گونه قابل ملاحظه‌ای چقرمگی جوش‌های رسوب داده شده را بهبود بخشیده [۱۵] که این دلیل برای نتیجه بالاست. مقایسه نتایج آزمایش‌های میکرو و ماکرو سختی سنجی با مقدار انرژی ضربه انجام شده است و هم‌چنین نزدیکی نتایج بالا با نمودارهای خوردگی و چقرمگی شکل ۸، نشان دهنده تطابق نتایج تجربی این پژوهش با نتایج تئوری است.

### نتیجه گیری

(۱) نتایج منحنی‌های پلاریزاسیون سیکیلی نشان دادند که برای ناحیه فلزات جوش نمونه‌های ۱ تا ۴ که به ترتیب دارای میانگین حرارت ورودی  $1/12$ ،  $1/02$ ،  $0/91$  و  $0/86$  می‌باشند، نرخ خوردگی به ترتیب  $0/004$ ،  $0/009$  و  $0/034$  (mm/yr) است.

(۲) نتایج نشان دادند که نمونه ۱ با داشتن بیش‌ترین حرارت ورودی، دارای بیش‌ترین نرخ خوردگی در ناحیه جوش و HAZ نسبت به دیگر نمونه‌هاست.

(۳) در هر ۴ نمونه، مقایسه نرخ خوردگی HAZ و فلز جوش با هم، بیانگر مقدار نرخ خوردگی بیش‌تر در HAZ آن نمونه است.

(۴) کاهش حرارت ورودی به نمونه‌ها باعث افزایش درصد حجمی فریت فلز جوش شده که بررسی تاثیرات این عامل بر نرخ خوردگی و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها، تطابق روند نتایج تجربی این پژوهش با نتایج تئوری را نشان داد.

(۵) نتایج این پژوهش نشان داد که نمونه ۲ با داشتن حرارت ورودی  $1/02$  kJ/mm، شرایط بهینه‌ای از نظر کاهش نرخ خوردگی، هم‌چنین، حصول ویژگی‌های مکانیکی مطلوب برای جوشکاری فولاد دوفازی 2205 را ایجاد می‌کند.

تصاویر برای نمونه‌های ۱ تا ۴، روند کاهش اندازه دانه‌های فریت در مناطق متاثر از حرارت نسبت به فلز پایه دیده می‌شود. هم‌چنین، در این منطقه مقدار آستنیت کم‌تری نسبت به فلز پایه و فلز جوش بوجود آمده است. میانگین پهنای ناحیه HAZ برای نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب تقریباً ۱۲۰، ۱۱۰، ۹۰ و ۵۰ میکرون بدست آمد. برای فولادهای دوفازی اندازه دانه در HAZ و پهنای این منطقه با افزایش حرارت ورودی افزایش می‌یابد. نتایج برخی از پژوهش‌ها [۱۶، ۱۷ و ۱۹] بیانگر این موضوع است که در فولادهای دوفازی 2205، فاز فریت در مقایسه با فاز آستنیت میزان سختی بیش‌تری داشته به‌گونه‌ای که فاز فریت حدود ۱۲ درصد از فاز آستنیت سختی بالاتری را نشان می‌دهد. نتایج پژوهش‌های پژوهشگرانی همچون وستن و لیائو [۲۱ و ۲۲] حاکی از این است که در فولادهای دوفازی معمولاً سختی منطقه جوش و HAZ نسبت به فلز پایه بیش‌تر است. این تا حدود زیادی ناشی از حجم بیش‌تر فریت بوده، اما تنش پسماند نیز می‌تواند به عنوان عامل کمک‌کننده ثانویه برای این کار باشد. با استفاده از این مطلب افزایش سختی فلزات جوش و HAZ نمونه‌های ۱ تا ۴ می‌تواند بر اثر رشد دانه‌های فاز فریت بوده و از سوی دیگر، افزایش تنش پسماند ناشی از جوشکاری و افزایش سرعت سرد شدن نیز به عنوان عامل کمکی [۲۱]، باعث افزایش سختی و در پی آن افزایش نرخ خوردگی HAZ در این نمونه‌ها شده است. نمونه ۴ دارای کم‌ترین حرارت ورودی و در پی آن افزایش سرعت سرد شدن و رشد بیش‌تر فاز سخت فریت را داشته که می‌تواند از دلایل افزایش بیش‌تر سختی نسبت به سایر نمونه‌ها باشد. نتایج آزمایش ضربه شاریپی از HAZ برای نمونه‌های ۱ تا ۴ مربوط به این پژوهش در دمای  $27^{\circ}\text{C}$  انجام شده که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با مقایسه این نتایج روند کاهش انرژی ضربه نمونه‌ها همراه با افزایش سختی

### References

1- A. Igual Munoz, J.Garcia Anton, J.L. Guinon, and V. Perez Herranz, "The Effect of Chromate in the Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel in LiBr Solutions", Corrosion Science, 48,4127-4151, 2006.

2- I. A. Armas, "Duplex Stainless Steels Brief History and Some Recent Alloys", Recent Patents on Mechanical Engineering, 1, 51-57, 2008.

3- The International Molybdenum Association, "Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless" Published

by the International Molybdenum Association (IMO), London, UK, page 51-53, second edition 2009.

4- E. Kivineva, " The Influence of Composition and Hot Processes on Heat Affected Zone and Weld Metal Behavior and Mechanical Properties of Ti Grade5 and Stainless Steel", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden, 2004.

۵- فتح یونس ل.، آزاد به م.، " بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر مقاومت به خوردگی پوشش فسفات Zn اعمالی بر فولاد ساده کربنی و تعیین دمای بهینه عملیات حرارتی"، مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۱.

۶- قهاری س.م، رئیسی ک.، شمعیان م.، " تاثیر حرارت ورودی بر ریز ساختار و رفتار خوردگی فلز جوش در جوشکاری قوس تنگستن-گاز فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750"، چهاردهمین کنگره ملی خوردگی، کد مقاله: CORROSION 1080 (R1)، ۲۴ تا ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲.

۷- صادقیان خشویی ر.، " ارزیابی مقاومت به خوردگی اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS 32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L"، چهاردهمین کنگره ملی خوردگی، کد مقاله: CORROSION 1028 (R3)، ۲۴ تا ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۲.

8- ASME Sec IX, Qualification Standard for Welding and Brazing Procedure, Article II, Welding Procedure Qualification, 2010.

9- J.C. Lippold and D. Koteki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.

10-A.L. Schaeffler, "Selection of Austenitic Electrodes for Welding Dissimilar Metals", Welding Journal, pp.601-620, 1947.

11- AWS B4.0, "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds", An American National Standard, 2007.

12- J.O. Nilsson, P. Jonsson and A. Wilson, "Formation of Secondary Austenite in Super Duplex Stainless Steel Metal and its Dependence on Chemical

Composition", Paper 39 in Duplex Stainless Steel 94, 1994.

13- C. P. Serna, A. I. Ramirez, N. Alonso-Falleros and S. D. Brandi, "Pitting Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Multipass Welds", in Proceedings of the 6th International Conference on Trends in Welding Research, ASM International, Materials Park, OH, pp. 17-22.h, 2003.

14- J. Pekkarinen and V. Kujanpaa, "The Effects of Laser Welding Parameters on the Microstructure of Ferritic and Duplex Stainless Steels Welds", Physics Procedia 5, 517-523, 2010.

15- S. Jatandeep and G. Nishant, "Welding of Duplex Stainless Steel", International Journal for Scientific Research & Development Vol. 1, Issue 3, ISSN (online): 2321-0613, 2013.

16- M. Barry, W. Andrew and O. Vasile, "Duplex Stainless Steel Welding Best practices (Part 1)", Stainless Steel World, Fluor Canada Ltd., Canada, November 2007.

17- J.D. Kordatos, G. Fournalis and G. Papadimitriou, "The Effect of Cooling Rate on the Mechanical and Corrosion Properties of SAF 2205 (UNS 31803) Duplex Stainless Steel welds", Scripta Mater. 44, 401-408, 2001.

18- E.L. Mehtedi, M. Spigarelli, S. Pricci, P. Paternoster E. Quandrini, "Mechanical Characterization of Phases in Duplex 2205 Stainless Steel by Nanoindentation Technique," La Metallurgia Italiana 9, 11-16, 2010.

19- J. Hay, "Mapping the Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel", Agilent Technologies, Document No: 5991-0381EN, Date Accessed: February 28, 2013, Available from: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5991-0381EN.pdf>

20- E.M. Westin, "Microstructure and properties of welds in the Lean Duplex Stainless Steel LDX 2101", Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Department

of Materials Science and Engineering  
Division of Physical Metallurgy , SE-  
10044 Stockholm Sweden,2010.

21- J. Liao," Nitride Precipitation in Weld  
HAZs of a Duplex Stainless Steel" ISIJ  
International, vol. 41, No. 5, pp. 460–467,  
2001.

### پیوست‌ها

جدول ۱ - آنالیز شیمیایی فلز پایه و فلز پر کننده بکار رفته (درصد وزنی).

عنصر	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	V	W	Pb	N	Fe
2205	۰/۰۳	۰/۶۹	۱/۶۷	۲۲/۶	۲/۵۲	۴/۶۴	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۰	بقیه
ER2209	۰/۰۲	۰/۵۰	۱/۴۳	۲۲/۲	۲/۶۳	۹/۱۷	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۰	بقیه

جدول ۲ - میانگین حرارت ورودی محاسبه شده برای نمونه‌ها.

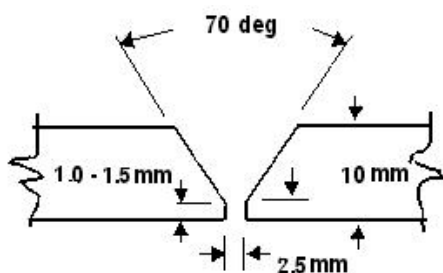
شماره نمونه	تعداد پاس‌های جوشکاری	میانگین جریان ثابت (آمپر)	مقدار حرارت ورودی برای هر پاس جوشکاری (kJ/mm)								میانگین حرارت ورودی (kJ/mm)	
			پاس ۱	پاس ۲	پاس ۳	پاس ۴	پاس ۵	پاس ۶	پاس ۷	پاس ۸		
۱	۸	۹۵/۵۰	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۶۴	۰/۶۰	۱/۰۵	۲/۱۱	۱/۴۰	۱/۵۸	۱/۱۲	-
۲	۷	۱۱۱/۲۹	۰/۸۳	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۸۷	۰/۹۸	۲/۰۸	۱/۳۸	-	۱/۰۲	-
۳	۷	۱۲۶	۰/۷۴	۰/۶۳	۰/۴۳	۰/۸۰	۰/۸۱	۱/۷۱	۱/۳۰	-	۰/۹۱	-
۴	۷	۱۴۲/۱۴	۰/۸۴	۰/۵۷	۰/۵۴	۰/۹۷	۰/۷۷	۱/۱۷	۱/۱۲	-	۰/۸۶	-

جدول ۳ - مقادیر بدست آمده از آزمایش پلاریزاسیون سیکلی برای نمونه‌های ۱ تا ۴.

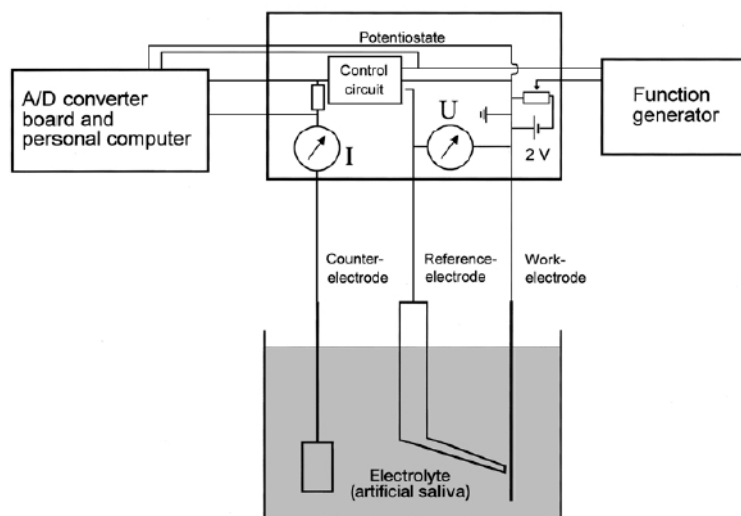
نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
فلز جوش HAZ	فلز جوش HAZ	فلز جوش HAZ	فلز جوش HAZ
۱۶۲/۱۴۰	۳۱۷/۲۱۰	۲۸۴/۸۳۰	۲۵۱/۱۹۰
شیب خط آندی (mV/dec)	۱۵۵/۱۲۰	۳۰۱/۴۹۰	۱۸۷/۳۳۰
۳۵۷/۳۲۰	۵۳۹/۵۹۰	۴۶۴/۵۵۰	۳۶۱/۶۹۰
شیب خط کاندی (mV/dec)	۳۳۹/۵۶۰	۵۱۱/۸۲۰	۴۱۷/۸۸۰
پتانسیل خوردگی در محاسبات (mV)	-۵۸۳/۱۱۰	۱۲/۰۴۰	-۸۵/۱۱۰
پتانسیل خوردگی روی نمودار (mV)	-۴۶۷/۳۷۰	۵۰/۱۲۰	۹/۳۹۰
دانشیه جریان خوردگی ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	۲۲/۸۰۰	۳۸۵/۵۷۰	۳۰۱/۱۳۰
خروجی جریان خوردگی ( $\mu\text{A}$ )	۱۱/۴۵۰	۱۹۳/۷۱۰	۱۵۹/۴۴۰
نرخ خوردگی	۰/۲۳۰	۰/۲۶۰	۰/۰۰۴
	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۹
	۰/۰۹۱	۰/۰۳۴	۰/۱۴۰



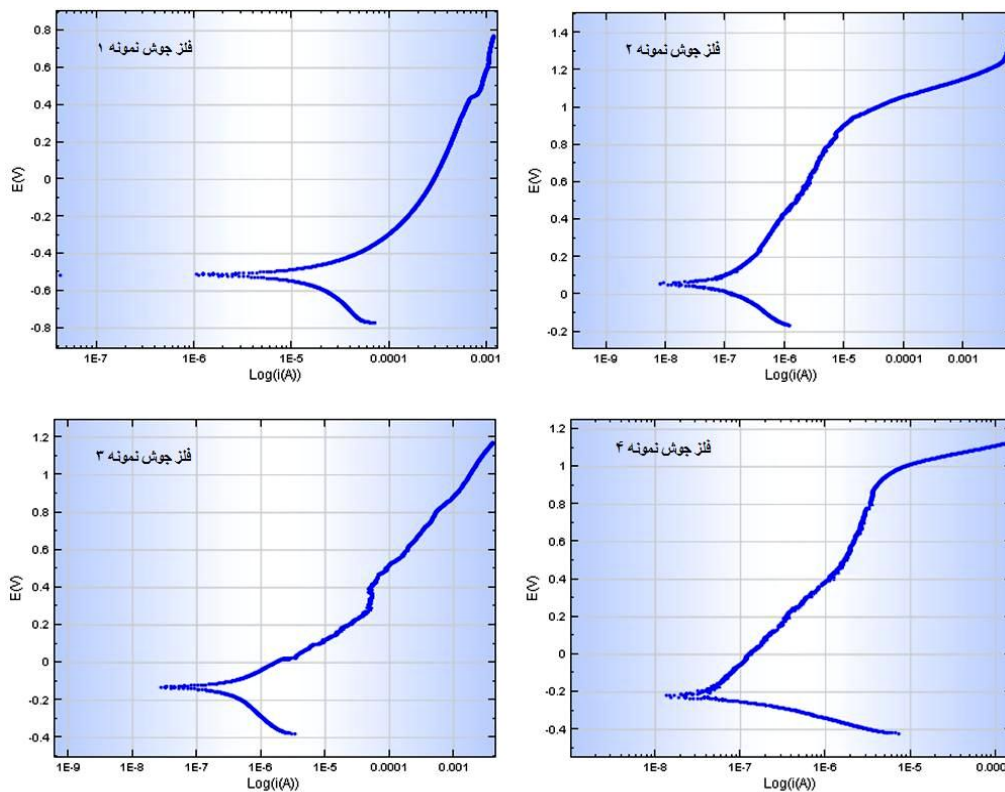
(mm/yr)								
-۰/۲۵۵	-۰/۱۷۲	-۰/۲۲۵	-۰/۱۲۹	-۰/۰۳۶	۰/۰۸۴	-۰/۵۴۵	-۰/۵۲۸	پتانسیل مدار باز (V)
۷۳/۹۴۰	۲۰۱/۱۴۰	۱۳۷/۸۰۰	۳۱۲/۶۳۰	۳۸۴/۵۱۰	۴۴۷/۸۳۰	۴/۰۳۰	۱۴/۵۷۰	مقاومت پلاریزاسیون (kΩ)
-۳۰۲/۸۹۰	-۲۶۴/۴۳۰	-۳۸۳/۱۵۰	-۱۹۸/۳۶۰	-۱۵۹/۴۵۰	-۹۱/۴۰۰	-۷۶۴/۴۷۰	-۶۳۲/۷۸۰	نقطه شروع پتانسیل انتخابی (V)
-۱۹۰/۷۳۰	-۱۰۵/۲۹۰	-۱۶۷/۳۹۰	-۹۲/۶۲۰	۲۶/۳۹۰	۲۵۶/۸۱۰	-۳۷۶/۸۵۰	-۳۹۴/۵۹۰	نقطه انتهای پتانسیل انتخابی (V)



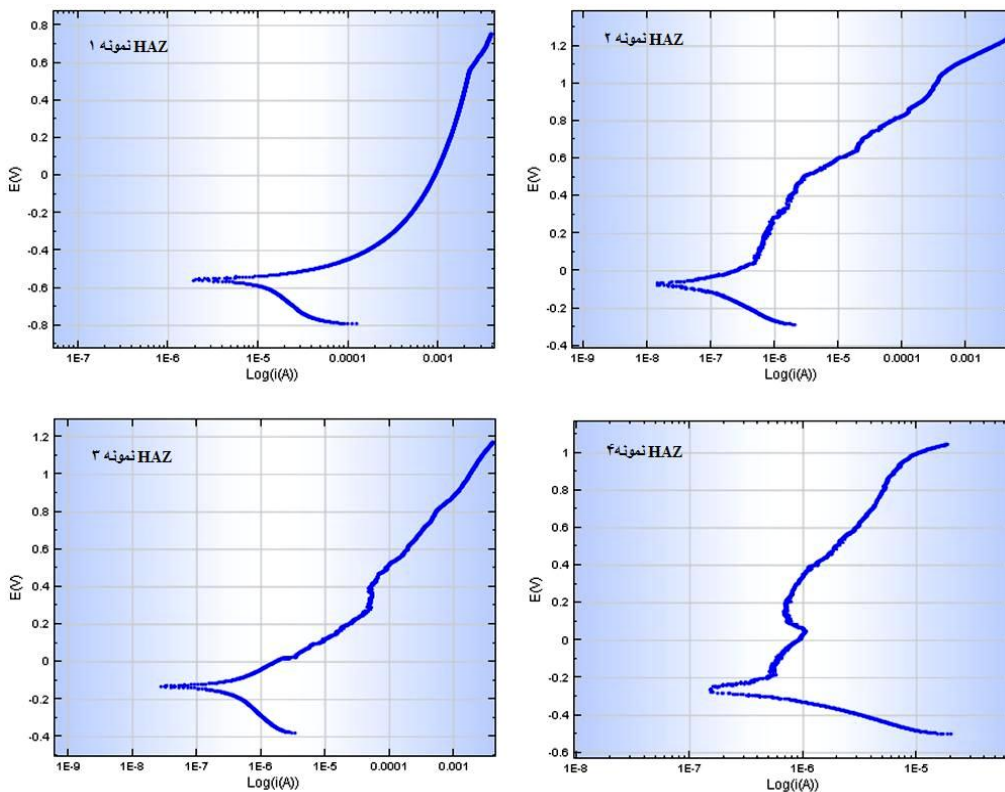
شکل ۱ - شماتیک طرح اتصال.



شکل ۲ - شماتیک دستگاه پتانسیواستات بکار رفته در آزمایش‌های خوردگی همراه با سل الکتروشیمیایی.

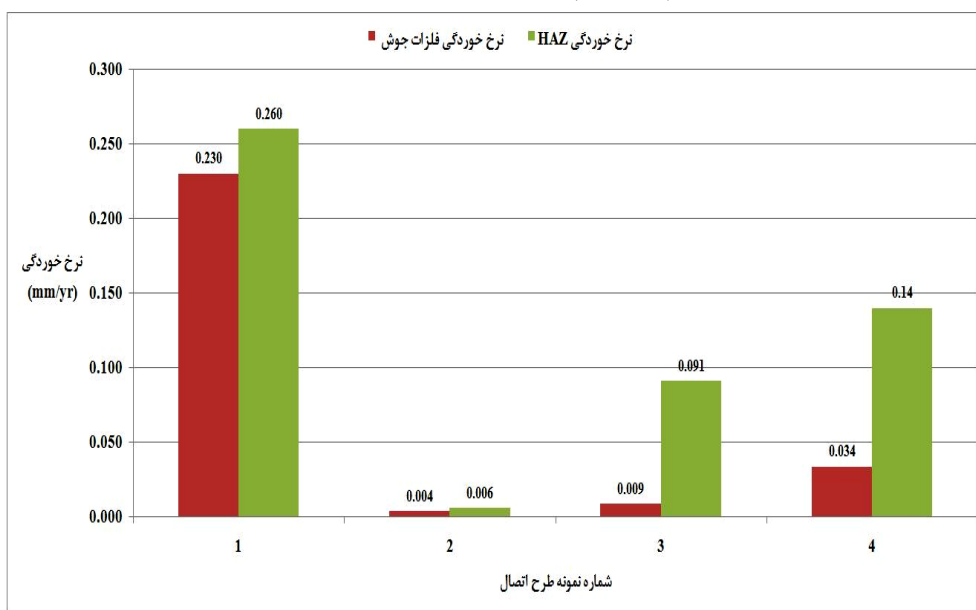


شکل ۳ - منحنی پلاریزاسیون برای ناحیه فلزات جوش نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب با میانگین حرارت ورودی ۱/۱۲ (kJ/mm<sup>2</sup>), ۱/۰۲, ۱/۹۱, ۱/۸۶.

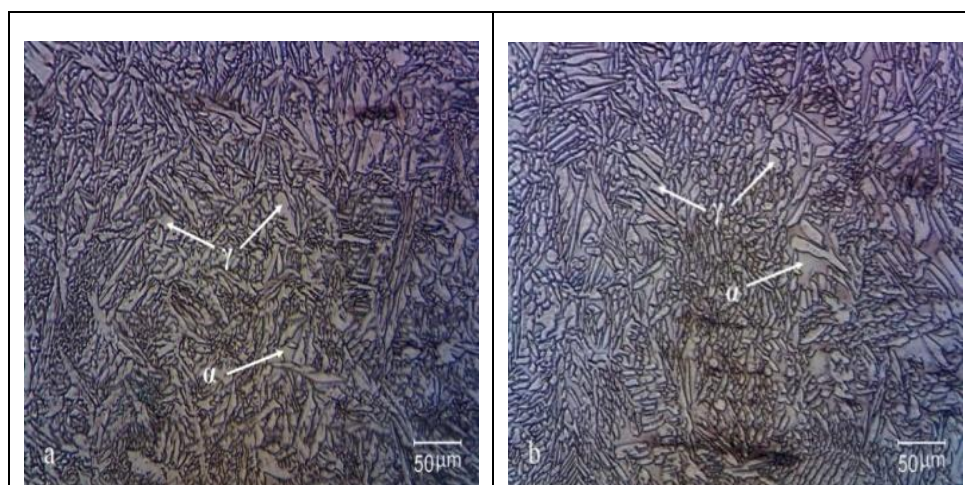


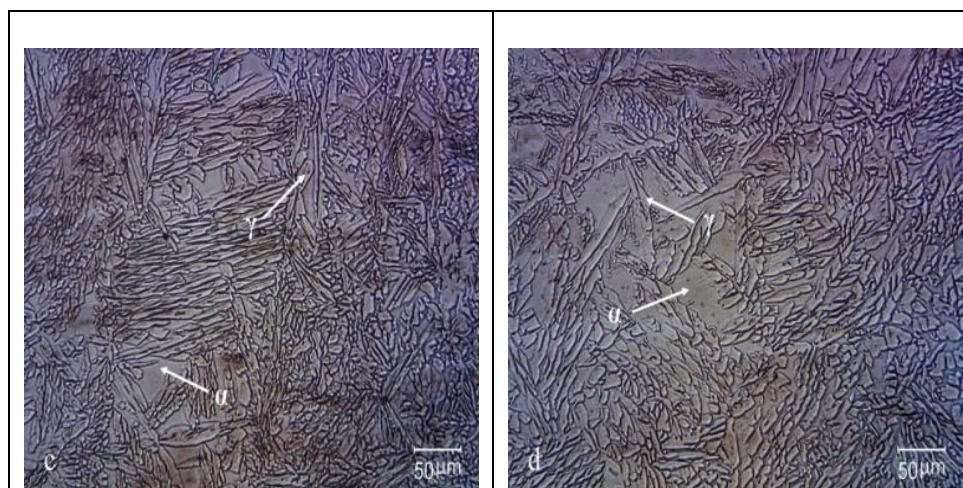
شکل ۴ - منحنی پلاریزاسیون برای ناحیه HAZ نمونه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب با میانگین حرارت ورودی

۱/۱۲ ، ۱/۰۲ ، ۰/۹۱ ، ۰/۸۶ (kJ/mm)

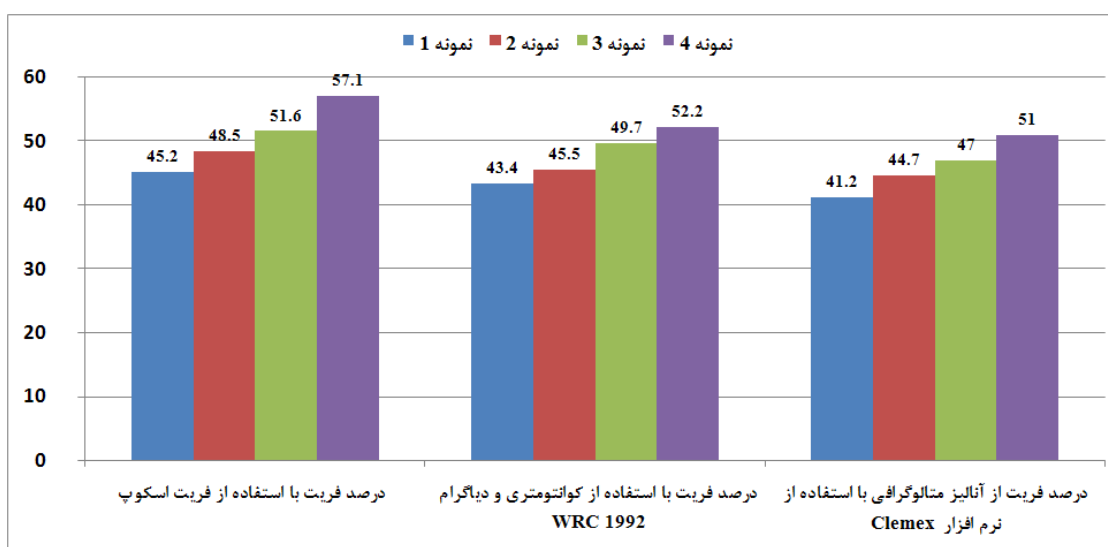


شکل ۵ - نرخ خوردگی در نواحی فلزات جوش و HAZ نمونه اتصال (۱) با میانگین حرارت ورودی (a) ۱/۱۲ (b) ۱/۰۲ (c) ۰/۹۱ (d) ۰/۸۶

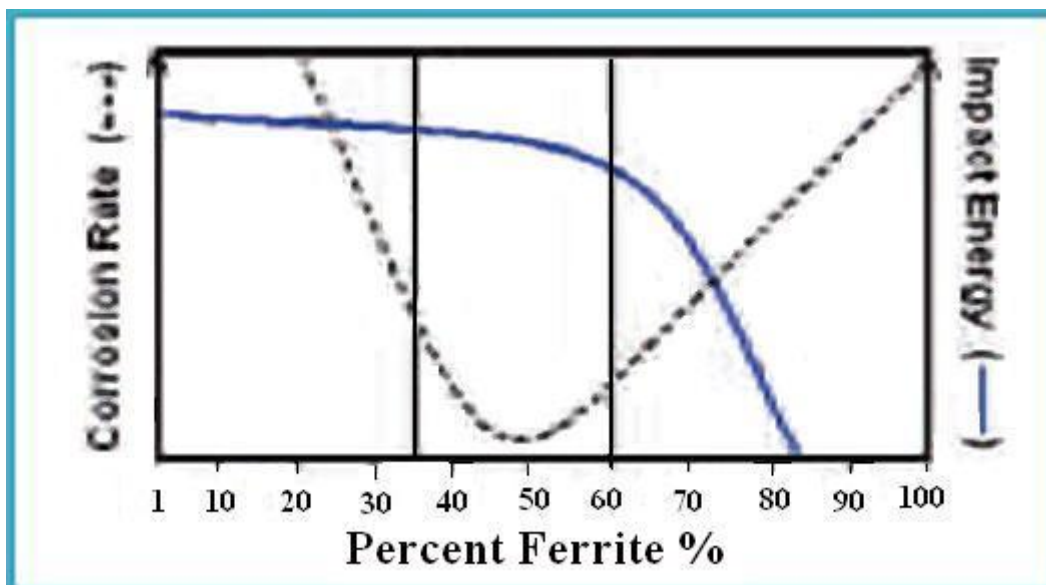




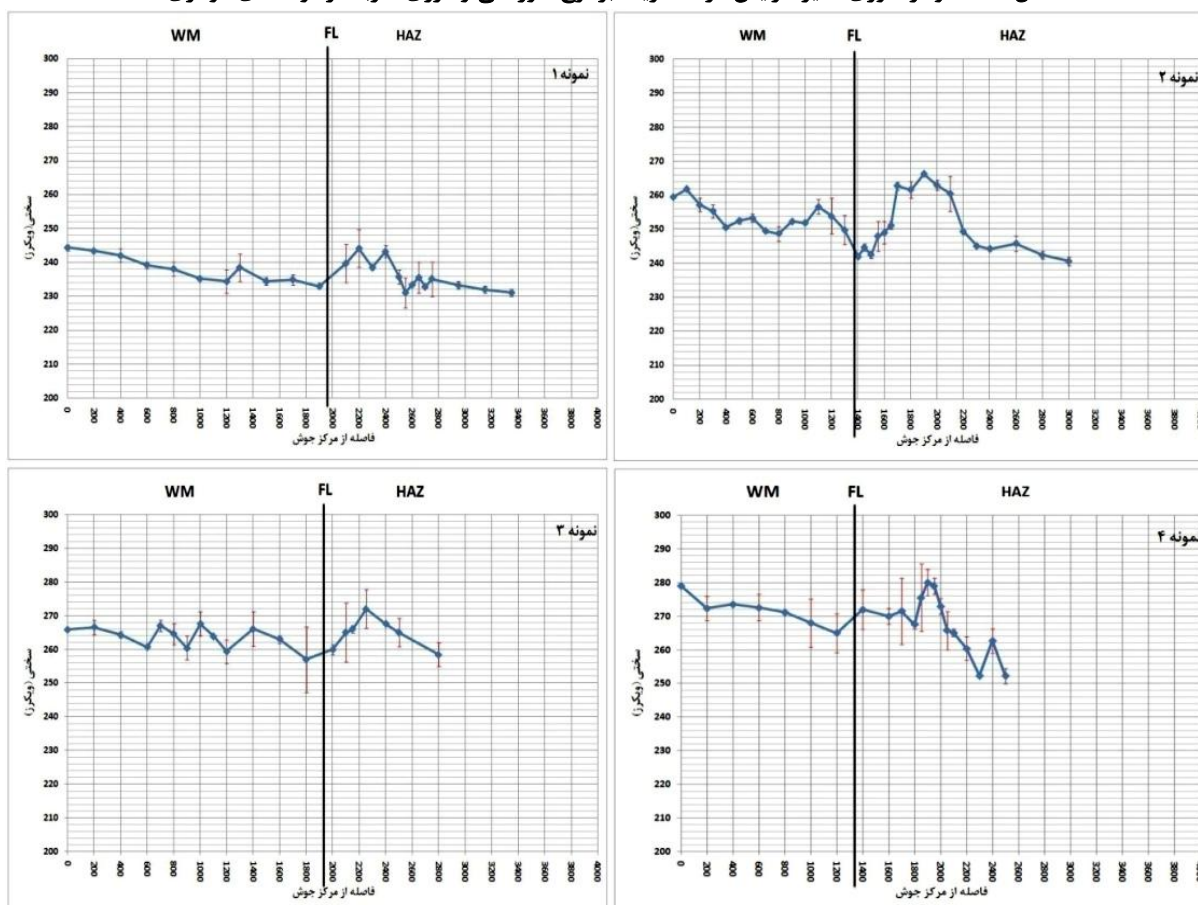
شکل ۶- تصاویر ریزساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش فولاد زنگ دوفازی ۲۲۰۵ برای نمونه‌های (a) میانگین حرارت ورودی ۱/۱۲ (b) ۱/۰۲ (c) ۰/۹۱ (d) ۰/۸۶



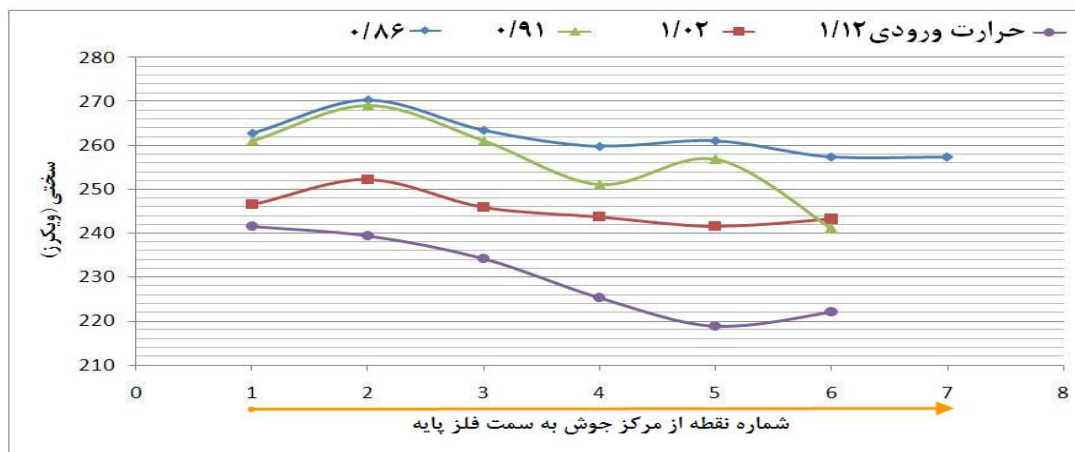
شکل ۷- نمودار مقایسه ای بین سه روش اندازه گیری و محاسبه مقدار فریت در فلز جوش برای نمونه های ۱ تا ۴.



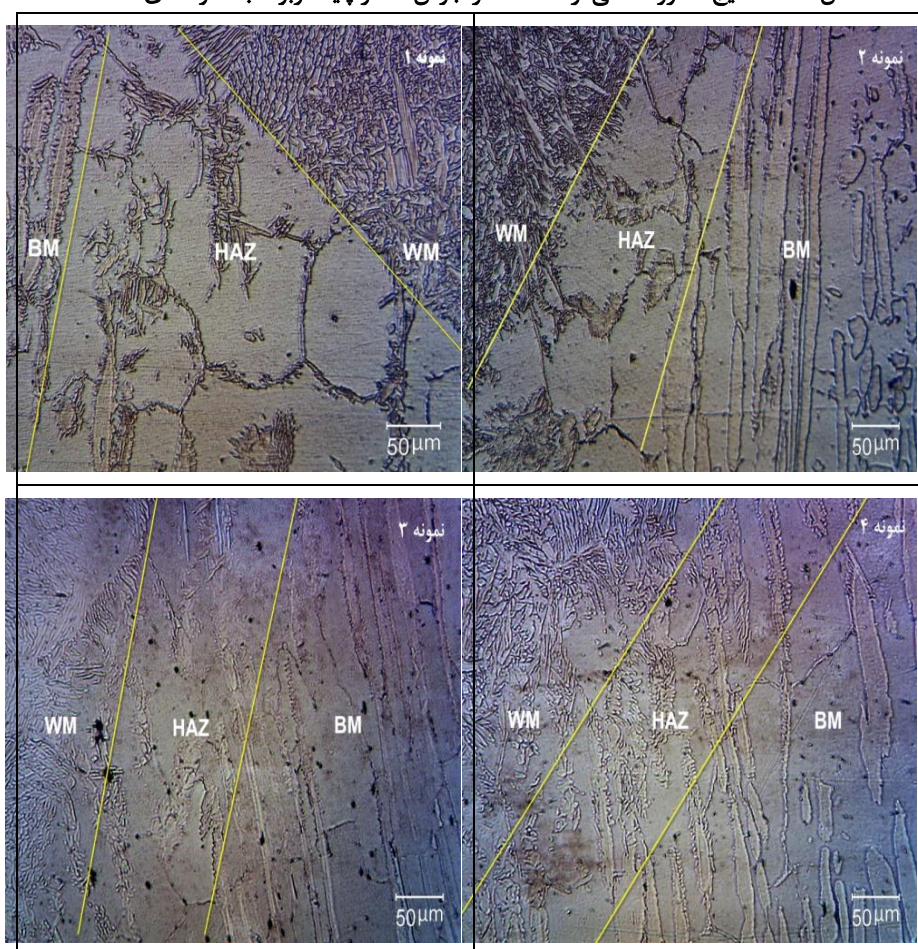
شکل ۸ - نمودار تئوری تاثیر افزایش درصد فریت بر نرخ خوردگی و انرژی ضربه در فولادهای دوفازی.



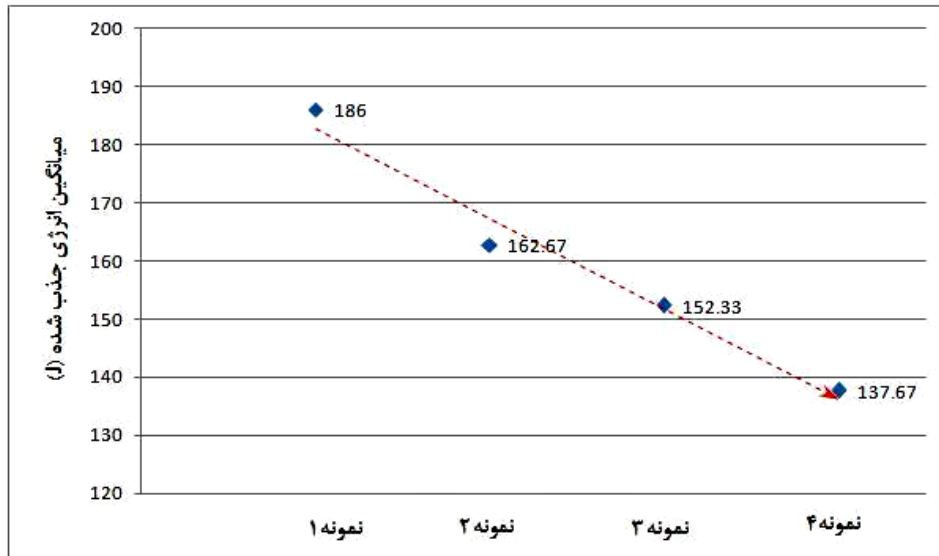
شکل ۹ - نیمرخ ریز سختی سنجی از قسمت فلز جوش تا فلز پایه مربوط به نمونه‌های ۱ تا ۴. قسمت فلز جوش (WM)، مرز ذوب (FL) و منطقه متأثر از حرارت (HAZ)



شکل ۱۰- نتایج ماکرو سختی از قسمت فلز جوش تا فلز پایه مربوط به نمونه‌های ۱ تا ۴.



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک فلز پایه و فلز جوش برای نمونه‌های ۱ تا ۴.



شکل ۱۲ - نتایج آزمایش ضربه شاریپی برای نمونه‌های ۱ تا ۴ در دمای  $27^{\circ}\text{C}$ .

