



## بررسی تاثیر سرعت دست در جوشکاری فولاد CK45: تحلیل همزمان خواص مکانیکی، عملکرد خوردگی، انرژی و زمان فرآیند

سیدمحمدرضا سده<sup>۱</sup>، علیرضا آرائی<sup>۲\*</sup>، مسعود جعفرپور<sup>۳</sup>، رها مولوی دوسنگانی<sup>۴</sup> و علی سینا مرتضایی مقدم<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد واحد سیرجان، سیرجان، ایران.

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

<sup>۵</sup> کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

### چکیده

در این مطالعه، تاثیر سرعت حرکت دست در جوشکاری قوسی دستی با الکترود E6013 بر ریزساختار، خوردگی و خواص مکانیکی جوش فولاد CK45 بررسی شد. بدین منظور، پنج نمونه با سرعت‌های ۱۷، ۲۰، ۲۶، ۳۲ و ۳۹ سانتیمتر بر دقیقه در وضعیت تخت جوشکاری شدند. هدف اصلی، تعیین سرعت بهینه‌ای بود که در آن با افزایش تدریجی سرعت، خواص بهبود یافته و سپس دچار افت شوند. آزمون‌های انجام شده شامل سختی‌سنجی ویکرز، خوردگی پتانسیودینامیک، آنالیز XRD جهت تعیین اندازه کریستالیت و میکرو کرنش و تحلیل OCP برای ارزیابی پایداری الکتروشیمیایی بود. نتایج نشان داد سرعت ۲۶ سانتیمتر بر دقیقه بهترین عملکرد کلی را ارائه می‌دهد، به طوری که کمترین میکروکرنش (۰/۰۲۱/۰)، اندازه کریستالیت ۶۸ نانومتر و بیشترین سختی (۲۶۵ ویکرز) در این شرایط ثبت شد. اگرچه نرخ خوردگی این نمونه برابر ۰/۰۷۹/۰ میلیمتر بر سال بود، اما یکنواختی ساختاری و توزیع مناسب فازها مشاهده شد. بیشترین نرخ خوردگی در سرعت ۱۷ سانتیمتر بر دقیقه با ۰/۲۲/۰ میلیمتر بر سال و کمترین آن در سرعت ۳۹ سانتیمتر بر دقیقه با ۰/۰۲۱/۰ میلیمتر بر سال به دست آمد، در حالی که سختی در این سرعت به کمترین مقدار یعنی ۱۸۶ ویکرز کاهش یافت. از دیدگاه اقتصادی، زمان فرآیند، مصرف انرژی و نرخ عیوب در سرعت‌های میانی بهینه شد. این نتایج اهمیت کنترل دقیق سرعت دست در بهبود همزمان خواص فنی و کارایی صنعتی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: جوشکاری؛ فولاد CK45؛ سرعت؛ خوردگی.

### Effect of Travel Speed on CK45 Steel Welding: A Comprehensive Analysis of Mechanical Properties, Corrosion Behavior, Energy Input, and Processing Time

Sayyed Mohammadreza Sedehi<sup>1</sup>, Alireza Araee<sup>2,\*</sup>, Masoud Jafarpour<sup>3</sup>, Raha Molavi dosangani<sup>4</sup>, Alisina Mortezaei Moghadam<sup>5</sup>.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Tehran Univ., Tehran, Iran.

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Tehran Univ., Tehran, Iran.

<sup>3</sup> M.Sc., Materials. Eng., Sirjan Azad Univ., Sirjan, Iran.

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng., Guilan Univ., Guilan, Iran.

<sup>5</sup> BSc. Student, Mech. Eng., Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

### Abstract

This study investigates the effect of hand travel speed in manual arc welding with E6013 electrodes on the microstructural, mechanical, and corrosion properties of CK45 steel welds. Welding was performed at five speeds (17–39 cm/min) in the flat position. Tests included Vickers hardness, potentiodynamic corrosion, XRD for crystallite size and microstrain, and OCP analysis. Results showed that 26 cm/min provided optimal performance, yielding the lowest microstrain (0.0021), smallest crystallite size (68 nm), and highest hardness (265 HV). Although the corrosion rate at this speed was moderate (0.0079 mm/year), good structural stability was achieved. The highest corrosion rate occurred at 17 cm/min (0.022 mm/year), while the lowest was observed at 39 cm/min (0.0021 mm/year), though with reduced hardness (186 HV). Overall, intermediate travel speeds optimized welding efficiency, energy consumption, and defect reduction, highlighting the importance of precise speed control in achieving balanced mechanical and corrosion performance.

**Keywords:** Welding; CK45 steel; speed; corrosion.

## ۱- مقدمه

جوشکاری یکی از حیاتی‌ترین و پرکاربردترین فرآیندهای تولید در صنایع گوناگون به شمار می‌آید که امکان ایجاد اتصال دائم، مستحکم و مؤثر میان قطعات فلزی و گاه غیر فلزی را فراهم می‌سازد [۱،۲]. این فرآیند نقشی کلیدی در ساخت سازه‌های سنگین [۳]، خطوط لوله [۴]، تجهیزات نیروگاهی [۵]، ماشین‌آلات صنعتی و حتی صنایع نوینی همچون رباتیک و تجهیزات پزشکی [۶،۷] ایفا می‌کند. توانایی ایجاد اتصالات با خواص مکانیکی مناسب، هزینه نسبی پایین نسبت به سایر روش‌های اتصال و قابلیت انجام در محیط‌های مختلف از جمله مزایای برجسته این فرآیند است [۸]. افزایش تقاضای جهانی برای محصولات فلزی مستحکم، سبک و مقاوم، باعث شده‌است که فرآیندهای جوشکاری نه تنها از منظر فنی، بلکه از جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی نیز مورد توجه ویژه قرار گیرند [۹]. در سال‌های اخیر، بهینه‌سازی فرآیندهای جوشکاری به منظور کاهش مصرف انرژی، افزایش سرعت تولید و ارتقای کیفیت اتصال، به یک اولویت در حوزه مهندسی ساخت تبدیل شده‌است [۱۰-۱۳]. از این رو، بررسی دقیق پارامترهای مؤثر در جوشکاری به ویژه در روش‌های دستی که همچنان در بسیاری از صنایع رایج هستند، ضروری به نظر می‌رسد [۱۴]. ورق‌های فولادی، به دلیل خواص متوازن مکانیکی، سهولت شکل‌پذیری، جوش‌پذیری مناسب و در دسترس بودن، یکی از پرکاربردترین مواد اولیه در ساخت سازه‌ها و قطعات صنعتی محسوب می‌شوند [۱۵،۱۶]. در میان انواع فولادها، فولادهای کربنی متوسط مانند CK45 با دارا بودن استحکام قابل قبول، سختی مناسب پس از عملیات حرارتی و مقاومت به سایش، در ساخت قطعات تحت بارهای دینامیکی یا تماسی نظیر شفت‌ها، محورها و چرخ‌دنده‌ها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷،۱۸]. با وجود مزایای فراوان، عملیات جوشکاری بر روی این فولادها می‌تواند منجر به بروز تغییرات در ساختار میکروسکوپی، به ویژه در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) گردد که در صورت عدم کنترل مناسب، خواص نهایی قطعه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۹]؛ بنابراین انتخاب دقیق پارامترهای فرآیند جوشکاری برای حفظ یا ارتقای خواص اولیه ورق فولاد CK45 امری ضروری و چالش‌برانگیز محسوب می‌شود [۲۰،۲۱]. در فرآیند جوشکاری دستی، یکی از عوامل انسانی تأثیرگذار، سرعت حرکت دست جوشکار در طول خط جوش است که به طور مستقیم بر شکل‌گیری حوضچه مذاب، عمق نفوذ، میزان حرارت ورودی و نرخ سردشدن تأثیر دارد [۲۲-۲۴]. تغییرات در این پارامتر می‌تواند سبب بروز تفاوت‌هایی در کیفیت اتصال، شکل خط جوش، وجود حفرات و ترک‌های داخلی شود.

از آنجا که سرعت دست مستقیماً به تجربه و مهارت اپراتور وابسته است، عدم توجه به این عامل در طراحی دستورالعمل‌های فنی، ممکن است منجر به کاهش یکنواختی در کیفیت اتصالات تولیدی گردد [۲۵].

افزون بر جنبه‌های فنی، سرعت دست نقش مؤثری در زمان کل عملیات، مصرف انرژی جوشکاری و در نتیجه هزینه نهایی تولید ایفا می‌کند [۲۶]. سرعت‌های پایین ممکن است به ایجاد جوش‌هایی با نفوذ بالا منجر شوند، اما معمولاً با افزایش زمان و هزینه‌ی فرآیند همراه‌اند. در مقابل، سرعت‌های بیش از حد نیز منجر به کاهش کیفیت اتصال و نیاز به تعمیرات ثانویه خواهند شد؛ بنابراین دستیابی به یک بازه بهینه از سرعت حرکت دست، می‌تواند راهکاری عملی برای بهبود راندمان اقتصادی فرآیندهای جوشکاری باشد [۲۶]. دو ویژگی حیاتی در ارزیابی کیفیت نهایی جوش، سختی سطحی و مقاومت به خوردگی هستند که مستقیماً با عملکرد و طول عمر قطعه در ارتباط هستند [۲۷]. سختی، به ویژه در کاربردهایی که تماس‌های مکرر یا بارهای سایشی وجود دارد، نقش مهمی در جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک یا سایش زود هنگام ایفا می‌کند [۲۸]. هرگونه افت سختی در منطقه جوش می‌تواند منجر به کاهش تحمل تنش و بروز ترک‌های سطحی شود، درحالی‌که افزایش بیش از حد آن نیز ممکن است شکنندگی قطعه را افزایش دهد [۲۹]. از سوی دیگر، جوشکاری با حرارت بالا می‌تواند باعث تغییرات میکروساختاری ناخواسته در ناحیه جوش و HAZ شود که کاهش مقاومت به خوردگی را به دنبال دارد [۳۰]. به ویژه در محیط‌های صنعتی که در معرض رطوبت، مواد شیمیایی یا نمک قرار دارند، کاهش مقاومت به خوردگی می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی و حتی از کارافتادگی قطعه گردد [۳۱]؛ بنابراین مطالعه هم‌زمان سختی و خوردگی در جوشکاری، یک ضرورت فنی برای تضمین کیفیت قطعات نهایی است [۳۲]. در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی به بررسی پارامترهای مختلف فرآیند جوشکاری فولادهای کربنی اختصاص یافته‌است. بیشتر این مطالعات تمرکز خود را بر متغیرهایی نظیر نوع الکترود، جریان ورودی، پیش‌گرمایش، فاصله دهانه جوش و طرح اتصال گذاشته‌اند [۳۳-۳۵]. نتایج نشان داده‌اند که این پارامترها می‌توانند تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های مکانیکی جوش، عرض منطقه متأثر از حرارت و شکل ریزساختار داشته باشند.

با این حال، اغلب پژوهش‌ها فاقد تحلیل جامع و یکپارچه‌ای هستند که اثرات اقتصادی و زمانی فرآیند را در کنار کیفیت فنی اتصال بررسی کنند؛ همچنین در اغلب مقالات، بررسی رفتار خوردگی در شرایط واقعی محیطی مغفول مانده یا به صورت

## ۲- مواد و آزمایشات

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش از ورق فولاد کربنی CK45 با ضخامت ۴ میلی‌متر و الکتروود دستی پوشش‌دار E6013 با قطر ۲/۵ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی درج شده جداول ۱ و ۲ استفاده شده‌است. فولاد CK45 به دلیل ترکیب مناسب از کربن، منگنز و عناصر آلیاژی جزئی، دارای سختی متوسط، قابلیت عملیات حرارتی و مقاومت مکانیکی مناسبی برای جوشکاری‌های صنعتی است. فرآیند جوشکاری با استفاده از الکتروود دستی پوشش‌دار E6013 با قطر ۲/۵ میلی‌متر و طبق شماتیک نشان داده شده در شکل ۱ انجام شد. این نوع الکتروود به دلیل قوس پایدار، چسبندگی خوب به سطح و ایجاد جوش نرم و یکنواخت برای ورق‌های متوسط بسیار مناسب است. الکتروودها به مدت ۳ ساعت در دمای ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا از رطوبت‌زدگی و بروز تخلخل در خط جوش جلوگیری گردد [۳۶].



شکل ۱- شماتیک فرآیند

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولاد CK45 (%w)

Fe	Si	Cr	C	P	Mn	S
پایه	۰,۲۵	۰,۲۷	۰,۴۶	۰,۱	۰,۵۷	۰,۱

جدول ۲- ترکیب شیمیایی الکتروود E6013 (%w)

Carbon (C)	Mg	Si	P	S
۰,۱۲-۰,۰۸	۰,۶-۰,۳	۰,۵-۰,۲	۰,۰۴	۰,۰۳۵

محدود انجام شده است. این خلأ در ادبیات پژوهشی، لزوم انجام مطالعاتی کاربردی و چندوجهی را بیش از پیش نمایان می‌سازد. در حوزه تأثیر سرعت حرکت دست، مطالعات محدودی انجام شده است که عمدتاً به بررسی ارتباط آن با عمق نفوذ و شکل هندسی خط جوش محدود شده‌اند. برخی از این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کاهش بیش از حد سرعت دست می‌تواند منجر به افزایش حرارت ورودی و تشکیل ساختارهای درشت‌دانه در HAZ گردد، در حالی که افزایش زیاد آن باعث جوش ناقص و تشکیل عیوب سطحی می‌شود [۱۰]. با این حال، تاکنون پژوهشی که به صورت هم‌زمان اثر سرعت دست جوشکار بر خواص مکانیکی، خوردگی، زمان عملیات و هزینه فرآیند را بررسی کند، انجام نشده یا به‌صورت نظام‌مند مستندسازی نشده است. این کمبود پژوهشی، به ویژه در زمینه فولادهای کربنی پرکاربردی مانند CK45، فرصتی مهم برای تولید دانش نوآورانه و کاربردی فراهم می‌آورد. پژوهش حاضر، با تمرکز بر نقش سرعت دست جوشکار در فرآیند جوشکاری دستی فولاد CK45، رویکردی چندوجهی و نوآورانه را ارائه می‌دهد که در آن مجموعه‌ای از شاخص‌های فنی و اقتصادی به طور هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برخلاف مطالعات پیشین که صرفاً بر کیفیت متالورژیکی جوش متمرکز بوده‌اند، این تحقیق تلاش دارد تا ارتباط میان مهارت انسانی (سرعت دست)، کیفیت فنی اتصال، بهره‌وری زمانی و مصرف انرژی جوشکاری را به صورت یکپارچه بررسی نماید. بدین ترتیب، این پژوهش نه تنها به درک عمیق‌تری از تأثیرات انسانی در فرآیندهای جوشکاری کمک می‌کند، بلکه راهکارهایی عملی برای ارتقاء عملکرد تولید، کاهش هزینه‌ها و افزایش دوام قطعات صنعتی در اختیار مهندسان و مدیران تولید قرار می‌دهد. این دیدگاه تلفیقی، افق‌های جدیدی را برای بهینه‌سازی فرآیندهای جوشکاری دستی در صنعت گشوده و می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر فرآیندهای تولیدی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا ورق فولاد CK45 به ابعاد مورد نیاز برای آزمایشات مختلف برش داده شد. جهت کاهش تأثیر حرارتی ناشی از برش بر ریزساختار نمونه‌ها، از دستگاه وایرکات استفاده گردید. این روش دقت بالا و حداقل اثر حرارتی را در مقایسه با برش مکانیکی یا پلاسما فراهم می‌آورد. پس از برش، تمامی سطوح مورد آزمایش با استفاده از برس سیمی، سنباده نرم و حلال استون تمیز شدند تا آلودگی‌های سطحی، اکسید آهن و زنگ‌زدگی حذف شود. این مرحله به منظور اطمینان از یکنواختی شرایط اولیه جوشکاری و تکرارپذیری نتایج صورت گرفت. جوشکاری نمونه‌ها به صورت دستی و در موقعیت تخت انجام شد. اپراتور مجرب، خط جوش را با حفظ پارامترهای ثابت جریان، ولتاژ و نوع الکتروود اجرا کرد، اما سرعت حرکت دست در طول خط جوش متغیر بود. سرعت‌های مختلف دست بر اساس معیار زمان جوش بر طول

خط، و مطابق جدول ۳ اندازه‌گیری و اجرا شد. این سرعت‌ها در سه سطح پایین، متوسط و بالا تنظیم شدند تا طیف متنوعی از شرایط جوش حاصل گردد. به منظور انجام دقیق آزمایش و اندازه‌گیری سرعت دست جوشکار، از سیستم نشانه‌گذاری و خط‌کش‌های مدرج در کنار قطعه استفاده و سرعت متوسط دست بر اساس زمان جوشکاری طول مشخصی محاسبه شد؛ همچنین منابع احتمالی خطا (مانند تغییرات جزئی در ریتم حرکت دست) در نظر گرفته شده‌اند. در تمامی نمونه‌ها جریان خروجی دستگاه جوشکاری در بازه ۱۱۰-۱۰۰ آمپر با ولتاژ کاری حدود ۲۲ ولت تنظیم شده بود. جریان و ولتاژ جوشکاری در تمامی مراحل به وسیله دستگاه کنترل و پایش شد و در یک بازه ثابت نگه داشته شدند. نوسانات احتمالی بسیار ناچیز بوده و در محدوده خطای قابل چشم‌پوشی قرار داشته‌اند.

جدول ۳ - شرایط جوشکاری

وضعیت جوشکاری	فاصله قوس (mm)	قطبیت	ولتاژ قوس (V)	شدت جریان (A)	نوع الکتروود	روش جوشکاری
تخت	۳-۲	AC	۲۵-۲۰	۱۰۰-۸۰	E6013 - Ø2.5	SMAW

جدول ۴ - نامگذاری نمونه‌ها

شماره نمونه	S1	S2	S3	S4	S5
سرعت دست (cm/min)	۱۷	۲۰	۲۶	۳۲	۳۹

## ۲-۳- مشخصه یابی

جهت بررسی سختی منطقه جوش از آزمون ویکرز با اعمال بار ۹/۶ نیوتن با فرورونده کاربید تنگستن به قطر ۲/۵ میلی‌متر و به مدت ۱۵ ثانیه مطابق با استاندارد ASTM A370 (2020) [۳۷] با دستگاه سختی‌سنج XL8000 INNOVATEST NEXUS اندازه‌گیری شد. حداقل ۳ نقطه از هر نمونه در مسیر عمود بر خط جوش اندازه‌گیری و میانگین نتایج گزارش گردید. جهت بررسی مقاومت به خوردگی، از آزمون پتانسیودینامیک پلاریزاسیون مطابق استاندارد ASTM G31-72 استفاده گردید [۳۸]. محیط آزمون محلول 3.5% NaCl در دمای اتاق بود و نمونه‌ها در پتانسیل بازمدار (OCP) به مدت ۳۰ دقیقه پیش از شروع آزمون نگهداری شدند. نرخ خوردگی (CR) و پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ ) توسط دستگاه پتانسیواستات مدل PARSTAT 2273 اندازه‌گیری و تحلیل شد. محیط 3.5% NaCl به دلیل شباهت بالا به محیط کلریدی واقعی (مانند آب دریا و محیط‌های صنعتی) انتخاب شده‌است. این محیط استاندارد در بیشتر مطالعات خوردگی فولاد استفاده می‌شود و امکان مقایسه‌پذیری

نتایج با تحقیقات دیگر را فراهم می‌سازد [۳۹،۴۰]. در ادامه آزمایش‌ها و با هدف بررسی دقیق‌تر فازهای موجود در نمونه و تغییرات احتمالی آن‌ها در منطقه جوش، آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. برای این منظور از دستگاه Explorer ساخت شرکت GNR ایتالیا تحت شرایط عملیاتی ۴۰kV و ۳۰mA مجهز به پرتو تابشی Cu K $\alpha$  در بازه زاویه‌ای ۱۰ تا ۹۰ درجه بهره‌برده شد تا شناسایی و تحلیل دقیق فازهای غالب و تغییرات ساختاری احتمالی ناشی از فرآیند جوشکاری امکان‌پذیر شود. الگوهای XRD جهت استخراج میکروکرنش و اندازه کریستالیت مورد تحلیل قرار گرفتند.

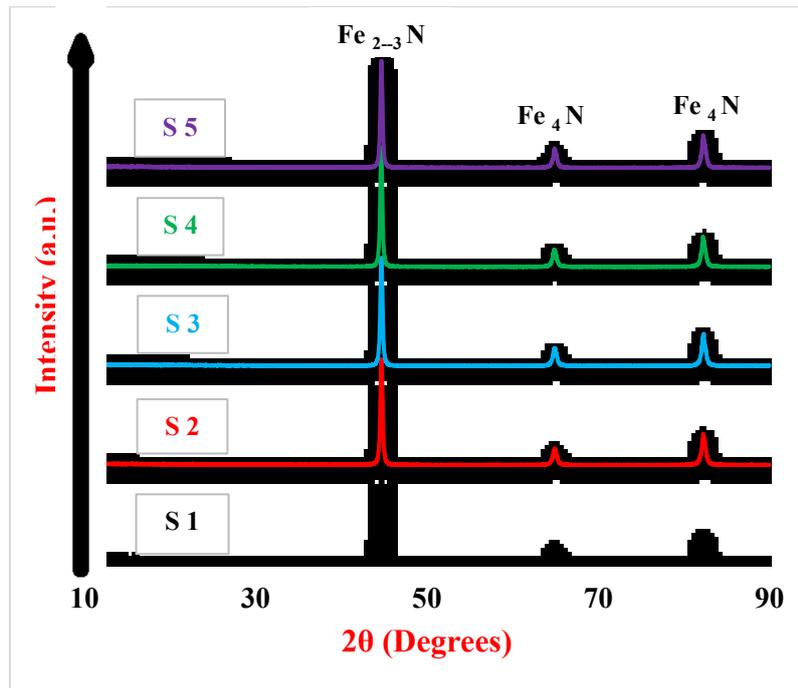
## ۳- بحث و نتیجه‌گیری

### ۳-۱- XRD

جهت شناسایی فازهای تشکیل شده در موضع جوش و استخراج میکروکرنش و اندازه کریستالیت، آنالیز طیف سنجی پراش پرتو ایکس روی نمونه‌ها انجام گرفت که نتایج آن روی نمونه‌های تولیدی در شکل ۲ مشخص است. نتایج حاصل از آزمون XRD برای پنج نمونه‌ای که با سرعت‌های دست مختلف جوشکاری

یک‌های XRD و با استفاده از معادله شرر به دست می‌آید، در نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب از ۲۷۰ نانومتر در نمونه اول تا ۶۸ نانومتر در نمونه سوم کاهش و سپس تا ۱۶۳ نانومتر در نمونه پنجم افزایش یافته است. این روند نشان می‌دهد که سرعت دست در هنگام جوشکاری تأثیر مستقیمی بر نرخ سرد شدن و تبلور مجدد دانه‌ها دارد. در نمونه سوم که دارای سرعت دست بهینه (۲۶ سانتی‌متر بر دقیقه) بوده، کوچک‌ترین اندازه کریستالیت به دست آمده که نشان دهنده ریزساختار بهینه، کاهش اندازه دانه و در نتیجه خواص مکانیکی مطلوب مانند افزایش سختی و استحکام است. کاهش اندازه کریستالیت تا این سطح معمولاً به دلیل نرخ سرد شدن یکنواخت و کنترل شده در ناحیه جوش است [۴۳]. مقادیر میکروکرنش بین نمونه‌ها به صورت غیرخطی توزیع شده‌اند؛ به گونه‌ای که در نمونه اول (با سرعت دست پایین) مقدار میکروکرنش ۰/۰۰۳ بوده و تا نمونه سوم به ۰/۰۰۲۱ مقدار کاهش یافته است. این افت نشان می‌دهد که با افزایش تدریجی سرعت دست تا حد بهینه، میزان تنش‌های پسماند و اعوجاج‌های شبکه‌ای کاهش یافته‌اند. در نمونه‌های چهارم و پنجم، مجدداً افزایش ملایم در میکروکرنش مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از نرخ سرد شدن بسیار سریع، انجماد غیرهمگن یا نوسان در حوضچه مذاب بوده است [۴۴]. این تغییرات نشان می‌دهند که سرعت دست جوشکاری نه تنها بر اندازه دانه‌ها بلکه بر تنش‌های پسماند نیز تأثیرگذار است و کنترل آن می‌تواند به کاهش عیوب و بهبود خواص مکانیکی کمک کند [۴۵، ۴۶].

شده‌اند، حاکی از آن است که هیچ تغییری در موقعیت پیک‌های اصلی مشاهده نمی‌شود. این مسئله نشان‌دهنده پایداری فازی در ساختار فلزی ناحیه جوش است، به این معنا که در محدوده سرعت‌های دست مورد استفاده (۱۷ تا ۳۹ سانتی‌متر/دقیقه)، هیچ‌گونه فاز جدیدی به وجود نیامده یا حذف نشده است. بلندترین پیک در زاویه ۴۵ درجه قرار دارد که معمولاً نشان دهنده فاز غالب فریت (Fe<sub>2-3</sub>N) در فولادهای ساده کربنی مانند CK45 است [۳۷]؛ همچنین، حضور پیک‌های ضعیف‌تر در زاویه‌های ۶۵ و ۸۵ درجه نیز تأییدکننده ساختار چند وجهی دانه‌های فریتی و احتمالاً حضور کمی فاز گاما پریم (Fe<sub>4</sub>N) در ساختار پایه است. ثابت بودن موقعیت و الگوی پیک‌های XRD در تمامی نمونه‌ها، نشان می‌دهد که افزایش سرعت دست در جوشکاری تأثیر معناداری بر نوع فازهای تشکیل شده ندارد، اما ممکن است بر شدت نسبی پیک‌ها و ویژگی‌های ثانویه مانند اندازه کریستالیت و میکروکرنش مؤثر باشد که در تحلیل‌های بعدی به آن‌ها پرداخته خواهد شد. بلندترین پیک در زاویه ۴۵ درجه بیانگر جهت‌گیری بافت بلوری غالب است، اما چنانچه شدت این پیک بین نمونه‌ها کمی نوسان داشته باشد، می‌توان آن را به تغییرات جزئی در اندازه دانه‌ها یا میزان تنش‌های باقی‌مانده ناشی از سرعت‌های مختلف انتقال حرارت نسبت داد [۴۱]. در مجموع، ثبات فازی در نتایج XRD می‌تواند نشانه‌ای مثبت از پایداری متالورژیکی ناحیه جوش با الکتروود E6013 باشد، به ویژه در شرایطی که تغییر پارامترهای جوشکاری به درستی کنترل شده باشند [۴۲]. اندازه کریستالیت که از تحلیل



شکل ۲- نتایج XRD نمونه های جوشکاری شده

### ۳-۲- سختی سنجی

تغییرات مشخصات میکروسختی در حضور انواع مختلف تقویت کننده در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر سختی اختصاص یافته نشان می‌دهد که نمونه سوم با سرعت دست ۲۶ سانتی‌متر/دقیقه بیشترین سختی را دارد (۲۶۵ ویکرز). در این نمونه، اندازه کریستالیت به حداقل مقدار (۶۸ نانومتر) رسیده و میکروکرنش نیز پایین‌ترین حد خود را دارد (۰/۰۰۲۱). این دو عامل نشان‌دهنده تشکیل ساختار ریزدانه، یکنواخت و فشرده در منطقه جوش هستند، که با در نظر گرفتن خواص حاصله کاملاً منطبق بر اصول ریزساختاری مواد است. با توجه به رابطه Hall-Petch، کاهش اندازه دانه به صورت مستقیم سختی را افزایش می‌دهد، چون مرز دانه‌ها مانع حرکت نابجایی‌ها شده و در نتیجه

مقاومت پلاستیکی ماده افزایش می‌یابد [۴۷]. از سوی دیگر، نمونه اول که دارای بیشترین اندازه دانه (۲۷۰ نانومتر و بیشترین میکروکرنش (۰/۰۰۳) است، پایین‌ترین مقدار سختی (۱۸۶ ویکرز) را نشان می‌دهد. افزایش میکروکرنش نشانه‌ای از وجود تنش‌های داخلی بیشتر و احتمالاً عیوب بلوری است که از انسجام ساختار کاسته و موجب افت خواص مکانیکی می‌شود. نمونه‌های میانی شماره ۲ و ۴ نیز با اندازه دانه‌ها و میکروکرنش‌های میانی، سختی‌هایی بین دو حالت فوق دارند؛ بنابراین این تحلیل نشان می‌دهد که تنظیم صحیح سرعت دست در جوشکاری به طور مستقیم بر اندازه کریستالیت و در نهایت سختی نهایی جوش مؤثر است. سختی پایین نمونه S4 با وجود کریستالیت کوچک، به دلیل حضور تنش‌های پسماند کمتر و همچنین پیروی از رابطه معکوس هال-پچ تفسیر می‌شود [۴۸].



شکل ۳ - نتایج میکروسختی ویکرز در نمونه های تولیدی

حرارتی مؤثر شده باشد که ایجاد لایه های اکسیدی یکنواخت تر و مقاومت خوردگی بهتر را موجب می شود. در مقابل، نمونه اول با نرخ خوردگی ۰/۰۲۲ میلی متر/سال بیشترین حساسیت به خوردگی را نشان داده است. میکروکنش بالا و اندازه دانه بزرگ نشان دهنده ساختار ناپایدارتر و پرتنش تر است که باعث تمرکز تنش های داخلی، تضعیف لایه اکسیدی و تسهیل حمله الکتروشیمیایی می شود [۵۲]. در کل، می توان گفت که برخلاف سختی که به ریزدانه شدن بستگی دارد، نرخ خوردگی بیشتر تابع تنش های پسماند و یکنواختی ساختار سطحی است [۵۳، ۵۴]. نمونه سوم با سختی بالا اما نرخ خوردگی متوسط، نشان می دهد که همواره بین مقاومت مکانیکی و مقاومت خوردگی، یک نقطه تعادل لازم است.

پس از یک دوره اعمال ولتاژ بر روی نمونه ها، نمونه مورد نظر در لحظه  $t = t_1$  به صورت مدار باز تنظیم می شود. از یک طرف، بار آزاد روی سطح نمونه از طریق مقاومت عایق آن نشت می کند و باعث کاهش پتانسیل سطح می شود. از طرف دیگر، با کاهش قطبش آرامش داخلی نمونه، بار محدود روی سطح نمونه به یک بار آزاد تبدیل می شود که منجر به افزایش چگالی بار آزاد سطح می شود که باعث افزایش پتانسیل سطح می شود. دو فرآیند فوق به طور همزمان وجود دارند و با یکدیگر رقابت می کنند. هنگامی که فرآیند اول غالب می شود، پتانسیل سطح با گذشت زمان کاهش می یابد. چگالی جریان کل  $j_{oc}(t)$  که در طول دپلاریزاسیون مدار باز از نمونه عبور می کند، طبق معادلات ۴-۶، صفر است [۵۵]:

۳-۳- آزمون خوردگی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک  
برای اندازه گیری خوردگی، شیب های تافل در ناحیه خطی منحنی های قطبش رسم و مقاومت قطبش بر اساس معادلات استرن-گری محاسبه شد که در زیر درج شده است [۴۸]:

$$R_p = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c) i_{corr}} \quad (1)$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (3)$$

که در آن  $R_p$  مقاومت قطبش خطی (LPR) نمونه تولیدی است،  $b_a$  و  $b_c$  نیز به ترتیب شیب های تافل آن دی و کاتدی هستند.  $I_{corr}$  چگالی جریان خوردگی و  $E_{corr}$  پتانسیل خوردگی است. در شکل ۴ آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و شکل ۵ نمودار OCP نمونه های مختلف نشان داده شده است. بر اساس داده های استخراج شده از رابطه استرن-گری [۴۹] کاهش پتانسیل خوردگی نشان دهنده کاهش احتمال خوردگی ترمودینامیکی در این نمونه ها است [۵۰]. نرخ خوردگی پایین ترین مقدار خود را در نمونه پنجم ۰/۰۲۱ میلی متر/سال نشان می دهد که با سرعت دست ۳۹ سانتی متر/دقیقه حاصل شده است. در این نمونه، گرچه اندازه کریستالیت نسبتاً زیاد (۱۶۳ نانومتر) است، اما میکروکنش در سطح متعادل قرار دارد (۰/۰۲۵) که می تواند نشان دهنده ساختار پایدار و بدون تنش زیاد باشد [۵۱]؛ همچنین افزایش سرعت دست در این نمونه ممکن است منجر به کاهش ناحیه

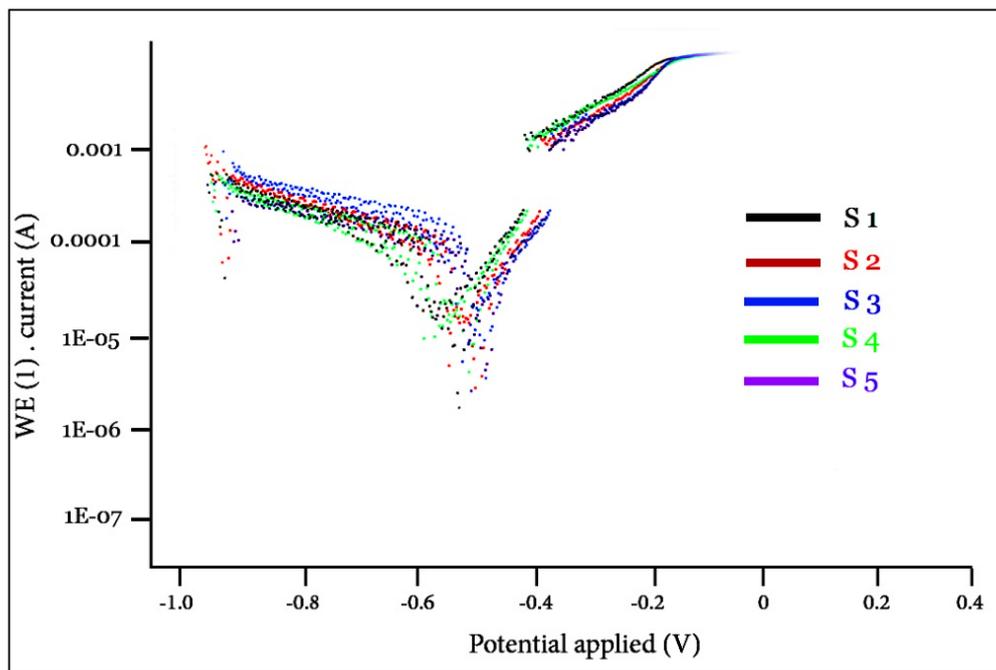
رفتار پایدار ولی نوسانی این نمونه ممکن است نشانه‌ای از یک ساختار سطحی خاص باشد که قادر است همواره خود را با شرایط محیط تنظیم کند بدون آن که دچار ناپایداری اساسی شود. در صنایع حساس نظیر پتروشیمی، نیروگاه‌های حرارتی و به‌ویژه صنایع دریایی که تجهیزات دائماً در معرض رطوبت، کلریدها و سایر عوامل خوردنده هستند، رفتار الکتروشیمیایی قطعات فلزی اهمیت حیاتی دارد. یکی از رایج‌ترین خطرات، خوردگی حفزه‌ای و خستگی خوردگی است که اغلب از ناپایداری در پتانسیل مدار باز ناشی می‌شود [۵۷]. در چنین شرایطی، کوچک‌ترین نوسانات غیرقابل کنترل در نمودار OCP می‌تواند نشانه‌ای از تشکیل ناقص لایه پسیو یا شکستن دوره‌ای آن باشد که موجب نشت، ترک یا حتی انفجار در خطوط لوله و تجهیزات فلزی می‌شود. به همین دلیل، ثبات و یکنواختی نمودار OCP به عنوان یک شاخص کلیدی در تست‌های کنترل کیفیت قطعات جوشکاری شده در نظر گرفته می‌شود. وقتی این موضوع را با پارامتر سرعت دست در جوشکاری دستی مرتبط کنیم، نتایج معناداری به دست می‌آید. نمونه‌هایی که با سرعت دست مناسب (مثلاً ۲۶ سانتی‌متر بر دقیقه) جوشکاری شده‌اند، به دلیل نرخ انتقال حرارت یکنواخت، نفوذ کنترل شده حوضچه مذاب، و زمان کافی برای تشکیل ساختارهای یکنواخت در خط جوش، ساختارهای متالورژیکی پایدارتر و مقاوم‌تری را نشان می‌دهند. این موضوع در نتایج XRD، میکروکرنش و همچنین OCP قابل مشاهده است. به طور خاص، نمونه‌ای مانند نمونه سوم که در سرعت دست بهینه قرار دارد، دارای کریستالیت‌های ریز، میکروکرنش کم، و پتانسیل پایدار بوده و نشان دهنده مقاومت الکتروشیمیایی مطلوب است [۵۸]. در مقابل، سرعت‌های بیش از حد بالا یا پایین، موجب ناپایداری لایه پسیو و نوسانات OCP شده و پتانسیل خوردگی را افزایش داده‌اند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تنظیم صحیح سرعت دست جوشکار، نه فقط یک مهارت عملی، بلکه یک اقدام استراتژیک در کاهش ریسک‌های صنعتی ناشی از خوردگی است.

$$j_{oc}(t) = \varepsilon_0(\chi_{\infty} + 1) \frac{dE(t)}{dt} + \frac{dP_s(t)}{dt} + \gamma(E)E(t) = 0 \quad (۴)$$

$$i_{oc}(t) = C_{\infty} \frac{du_{oc}(t)}{dt} + \frac{d[C_s(u)u_{C_s}(t)]}{dt} + G_{DC}(u)u_{oc}(t) = 0 \quad (۵)$$

$$\frac{d[C_s(u)u_{C_s}(t)]}{dt} = \frac{u_{oc}(t) - u_{C_s}(t)}{R_s(u)} \quad (۶)$$

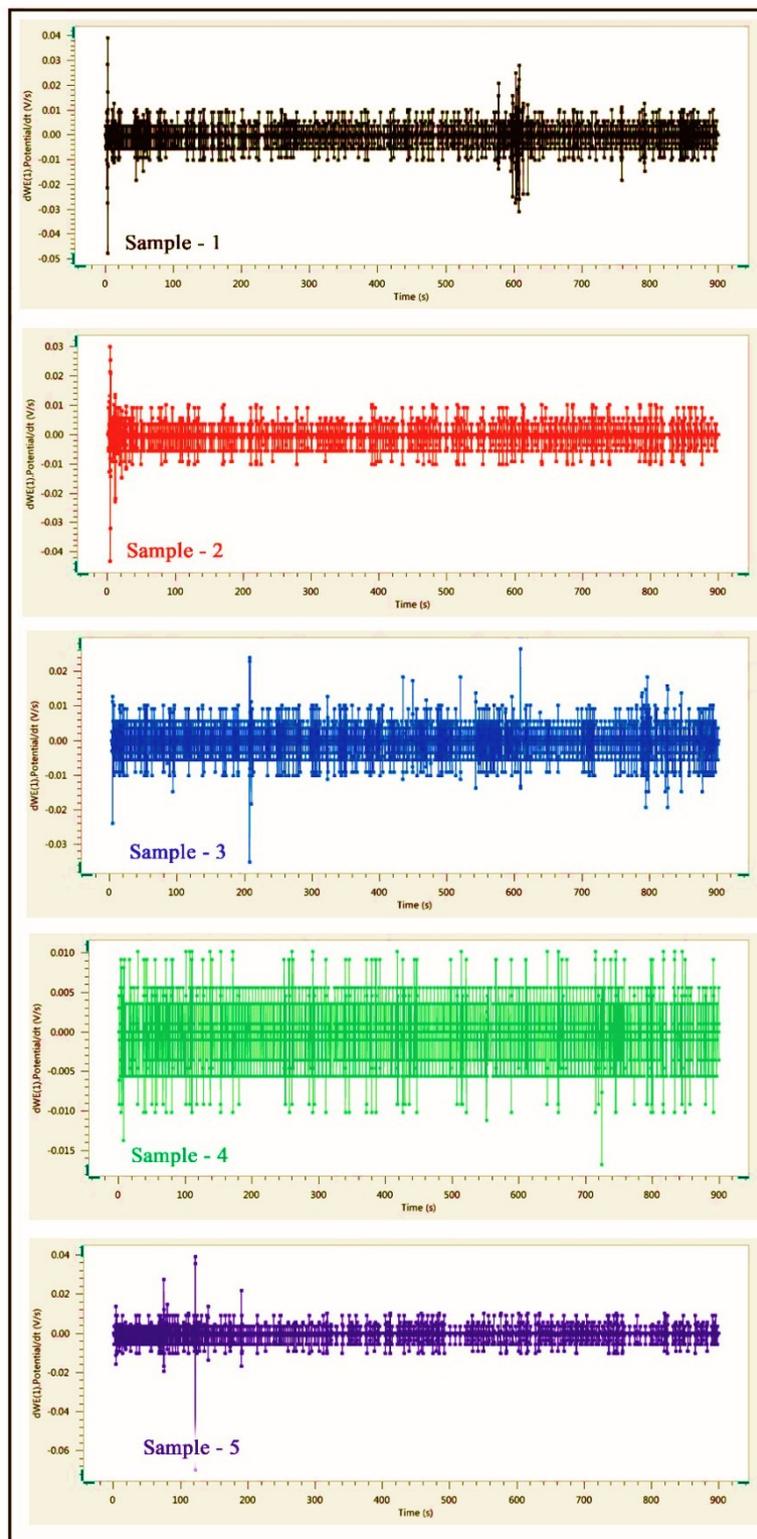
رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌ها بر اساس داده‌های OCP نشان می‌دهد که چهار نمونه اول در محدوده نوسانی  $\pm 0.01$  V قرار داشته‌اند که خود نشان‌دهنده پایداری نسبی پتانسیل خوردگی در شرایط بدون پلاریزاسیون است. این ثبات پتانسیل در بازه‌ای محدود معمولاً بیانگر تشکیل یک لایه پسیو یکنواخت و نسبتاً پایدار روی سطح فلز است که از ورود الکتروولیت به زیر سطح فلز جلوگیری می‌کند [۵۶]. در نمونه اول و دوم، با اینکه در ابتدا پراش (افت سریع پتانسیل) مشاهده شده، اما پس از مدت کوتاهی نمودار به حالت پایدار و خطی رسیده که بیانگر تکامل سریع لایه پسیو در دقایق ابتدایی است. البته باید به نوسان نسبتاً شدید در نمونه اول حوالی ثانیه ۶۰۰ اشاره کرد که می‌تواند به دلیل ناپایداری مقطعی در لایه پسیو یا واکنش‌های محلی باشد. در مقابل، نمونه پنجم رفتار متفاوتی را نشان داده است. این نمونه، نوساناتی در محدوده  $\pm 0.02$  V را ثبت کرده که از نظر دامنه تقریباً دو برابر دیگر نمونه‌هاست، اما نکته مهم این است که علی‌رغم این نوسانات بزرگ‌تر، منحنی OCP هیچ پیک آغازینی در زمان شروع آزمون نشان نداده و از ابتدا رفتار پایداری را ارائه کرده است. این ویژگی می‌تواند به معنای تشکیل لایه‌ای یکنواخت و پایدار از همان ابتدای تماس با محیط خوردنده باشد. نوسانات با دامنه بیشتر ممکن است مربوط به پاسخ پویا و حساس سطح در برابر تغییرات الکتروولیت باشد، اما فقدان پیک آغازین و حفظ ثبات کلی در طول زمان می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از مقاومت خوردگی بالاتر نمونه پنجم تلقی شود. به بیان دیگر،



شکل ۴ - نتایج آزمون خوردگی نمونه‌های تولیدی

جدول ۵ - مقادیر نتایج آزمون خوردگی

Parameter	S1	S2	S3	S4	S5
$E_{corr}$ (V vs. Ag/AgCl)	-۰/۵۹۴	-۰/۶۴۰	-۰/۶۸۰	-۰/۶۳۸	-۰/۶۲۷
$i_{corr}$ (A)	۲/۲۶۱۵ E-۰۶	۱/۴۵۳۲ E-۰۶	۱/۰۴۴۱ E-۰۶	۹/۴۰۸۴ E-۰۷	۷/۲۴۳۲ E-۰۷
$b_a$ (V/decade)	۰/۰۹۳۸	۰/۰۹۴۰	۰/۰۶۸۴۵	۰/۰۷۷۵۱۵	۰/۰۶۸۱۱
$b_c$ (V/decade)	۰/۱۰۶۳۵	۰/۰۶۹۸	۰/۰۹۴۵۸	۰/۰۶۳۴۳۶	۰/۰۶۹۸
$R_p$ (ohm)	۷۳۰۸/۹	۱۱۹۷۵	۱۶۵۱۸	۱۶۱۰۴	۱۵۹۷۴
Corrosion rate (mm/year)	۰/۰۲۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۲۱



شکل ۵ - مقادیر نتایج OCP آزمون خوردگی

در طول‌های مختلف توزیع می‌شود، در سرعت پایین توان بیشتری به هر میلی‌متر می‌رسد و در سرعت بالا همان توان روی طول بزرگ‌تری پخش می‌شود؛ بنابراین برای کنترل خواص مکانیکی و میکروساختار قطعه جوش خورده، باید سرعت جوش کاری را همراه با انتخاب توان و پارامترهای دیگر (مثلاً پیش‌گرمایش، خنک‌سازی کنترل‌شده، یا چند پاس جوش) به‌گونه‌ای تنظیم نمود که ورودی گرما (Q) در بازه مطلوب برای رسیدن به خواص موردنظر باقی بماند. در سرعت‌های پایین‌تر از حد بهینه مانند ۱۷ سانتی‌متر/دقیقه، زمان فرآیند افزایش یافته، در نتیجه انرژی بیشتری صرف می‌شود، احتمال سوختگی کناره جوش افزایش می‌یابد و مصرف جریان نیز در مدت زمان طولانی‌تری باقی می‌ماند. در مقابل، سرعت‌های بالاتر از حد بهینه مثل ۳۹ سانتی‌متر/دقیقه، هرچند زمان جوشکاری را کاهش می‌دهند، اما منجر به جوش‌های سطحی با نفوذ ناقص می‌شوند که نیاز به تعمیر مجدد یا دوباره کاری داشته و همین امر موجب اتلاف منابع و افزایش هزینه‌های نهایی پروژه می‌گردد [۶۷]. در یک بررسی مهندسی-اقتصادی، سرعت بهینه دست در حدود ۲۶ سانتی‌متر/دقیقه نه تنها موجب تشکیل ساختاری همگن و سختی بالا شده، بلکه کمترین نرخ خوردگی و همچنین پایداری الکتروشیمیایی در آزمون OCP را از خود نشان داده است. از منظر اقتصادی، این پارامتر بهینه باعث حداقل زمان جوشکاری، مصرف بهینه انرژی و پایین‌ترین احتمال تعمیر مجدد می‌شود. این یعنی کاهش زمان توقف در خطوط تولید یا نگهداری، افزایش طول عمر سرویس‌دهی قطعه و در نهایت کاهش هزینه‌های ناشی از خرابی و بازرسی مجدد. چنین تحلیل‌هایی در پروژه‌های بزرگ نفت و گاز، پالایشگاه‌ها یا خطوط حمل و نقل فلزی، می‌تواند باعث صرفه‌جویی گسترده‌ای در هر فاز عملیاتی شود. نتایج کلی آزمایش در جدول ۶ و شکل ۶ درج شده است. منحنی آبی نمایانگر مقدار سختی بوده که در سرعت ۲۶ سانتی‌متر/دقیقه به بیشترین حد خود می‌رسد. خط آبی کمرنگ نقطه‌چین معرف اندازه کریستالیت که در همان سرعت به کمترین مقدار رسیده است. منحنی قرمز نرخ خوردگی را نمایش می‌دهد که با افزایش سرعت، کاهش یافته و در سرعت ۳۹ سانتی‌متر/دقیقه کمترین مقدار را دارد و در نهایت خط نارنجی نقطه‌چین نشان دهنده میکروکرنش که در میانه (S3 و S4) کمینه است.

### ۳-۴- تحلیل مصرف انرژی، زمان جوشکاری و اقتصاد مهندسی

در فرآیند جوشکاری با الکتروود دستی، یکی از فاکتورهای کلیدی در مصرف انرژی و راندمان اقتصادی، سرعت حرکت دست اپراتور است که مستقیماً بر زمان جوشکاری، مصرف الکتروود، تلفات حرارتی و یکنواختی انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد [۵۹]. مقادیر راندمان برای فرآیندهای جوشکاری عمدتاً بر اساس منابع قدیمی تر [۶۳-۶۰] یا استانداردهای جوشکاری قابل اجرا هستند. در این استانداردها [۶۵، ۶۴]، فقط راندمان‌های کلی برای فرآیندهای جوشکاری مختلف بدون تمایز برای شرایط فرآیند قابل تنظیم نشان داده شده‌اند. محاسبه گرمای ورودی با فرمول ۱ انجام می‌شود [۶۶]:

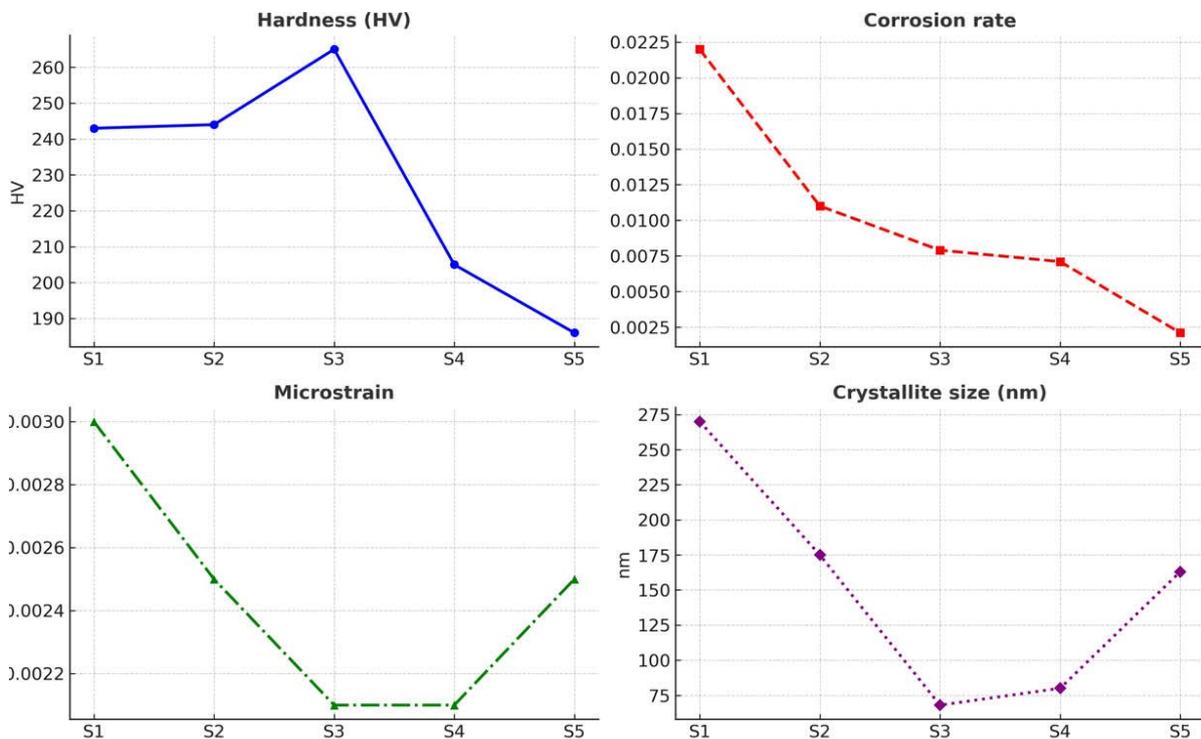
$$Q = \frac{P_w}{v_w} \times \eta \quad (1)$$

که در آن Q ورودی گرما (kJ/mm)،  $P_w$  توان جوشکاری (W)،  $v_w$  سرعت جوشکاری (mm/s)،  $\eta$  راندمان فرآیند جوشکاری است. گرمای ورودی به قطعه نه تنها به راندمان فرآیند، بلکه به توان و سرعت جوشکاری نیز وابسته است. می‌توان بلافاصله از رابطه (۱) نتیجه گرفت که با ثابت در نظر گرفتن توان جوش  $P_w$  و راندمان فرآیند  $\eta$ ، ورودی گرما به صورت وارون با سرعت جوشکاری  $v_w$  تغییر می‌کند ( $Q \propto \frac{1}{v_w}$ )، بنابراین اگر سرعت جوشکاری کاهش یابد، مقدار Q به ازای هر میلی‌متر طول جوش افزایش می‌یابد (مثلاً با نصف شدن  $v_w$ ، Q دو برابر می‌شود) و بالعکس افزایش سرعت جوشکاری باعث کاهش ورودی گرما به واحد طول می‌گردد. از دید عملی این تغییر در Q پیامدهای مهمی در توزیع و اثرات حرارتی دارد: سرعت کم موجب ورودی گرمای بالاتر به واحد طول و سیکل حرارتی طولانی‌تر، منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) پهن‌تر، عمق نفوذ بیشتر، خنک‌سازی آهسته‌تر، افزایش احتمال اعوجاج و تنش باقیمانده، و رشد دانه‌ها (ناشی از زمان ماند بالاتر در دماهای بالا) می‌گردد. به طبع این تحلیل، سرعت بالاتر موجب ورودی گرمای کمتر به واحد طول، HAZ باریک‌تر، نفوذ کمتر (احتمال عدم اتصال یا نفوذ ناکافی)، نرخ خنک‌شدن سریع‌تر که می‌تواند منجر به ریزساختارهای سخت‌تر و شکننده‌تر شود و کاهش اعوجاج ولی افزایش احتمال ناهمسانی جوش (مثلاً محل‌های با ذوب ناقص) است. لازم به ذکر است که اگرچه توان لحظه‌ای منتقل شده از منبع  $P_w$  در هر دو حالت ثابت است، تفاوت اساسی این است که توان مشخص

جدول ۶ - نتایج کلی آزمایش

شماره	سرعت دست (cm/min)	سختی (HV)	نرخ خوردگی	میکرو کرنش	اندازه کریستالیت (nm)
S1	۱۷	۲۴۳	۰/۰۲۲	۰/۰۰۳	۲۷۰
S2	۲۰	۲۴۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲۵	۱۷۵
S3	۲۶	۲۶۵	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۲۱	۶۸
S4	۳۲	۲۰۵	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۲۱	۸۰
S5	۳۹	۱۸۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۵	۱۶۳

Overall experimental results diagram



شکل ۶ - نگاه کلی نتایج

### نتیجه گیری

پتانسیل الکتروشیمیایی و تشکیل موفق لایه پسیو را

می توان به دقت کنترل سرعت جوش نسبت داد.

۳. از لحاظ اقتصادی، نمونه بهینه نه تنها کمترین انرژی و زمان را برای یک جوش استاندارد نیاز دارد، بلکه نیاز به دوباره کاری یا تعمیرات پس از جوشکاری را به حداقل می رساند.

۴. سرعت های خارج از محدوده بهینه (چه کم و چه زیاد)، موجب کاهش سختی، افزایش نرخ خوردگی، افت کیفیت ساختاری و افزایش هزینه های ناشی از اتلاف انرژی و دوباره کاری شده اند.

۱. از نظر خواص مکانیکی، نمونه ای که با سرعت دست ۲۶ سانتی متر/دقیقه جوشکاری شده (نمونه سوم)، بیشترین سختی و ریزترین اندازه کریستالیت را از خود نشان داده که نشان دهنده ساختار همگن و مقاومت بالا در برابر تغییر شکل است.

۲. از منظر خوردگی، همین نمونه دارای کمترین نرخ خوردگی و میکروکرنش پایدار بوده است که با نتایج آزمون OCP نیز همخوانی دارد، به این معنا که پایداری

- [5] Duhanets V, Semenyshena R, Fedirko P, Pukas V, Volynkin M (2025) Application of automated welding processes in restoration of pipelines of power facilities. *Mach Energetics* 16(1).
- [6] Kuo C-C, Chen H-W, Farooqui A, Huang S-H, Tseng S-F (2025) Enhancing mechanical integrity of polylactic acid components via ultrasound-assisted rotary friction welding for sustainable medical device fabrication. *J Manuf Process* 141:1324–1336.
- [7] Bhattacharjee J, Roy S (2025) Welding automation and robotics. *Adv Weld Technol* 47–71.
- [8] Kunar S, Mandal G (eds) (2025) *Advanced Welding Technologies*. John Wiley & Sons.
- [9] Doncheva E, Avramov N, Krstevska A, Petreski M, Djokikj J, Djidrov M (2024) Sustainability and environmental life cycle analysis of welding processes. *Int J Struct Integr*.
- [10] Dhas J-E, Dhas S-J (2012) A review on optimization of welding process. *Procedia Eng* 38:544–554.
- [11] Soto-Diaz R, Vásquez-Carbonell M, Escorcía-Gutiérrez J (2025) A review of AI techniques for optimizing friction stir welding processes and predicting mechanical properties. *Eng Sci Technol Int J* 62:101949.
- [12] Merga A, Gutema E-M, Gopal M, Lemu H-G (2025) Numerical simulation of temperature distribution and residual stress in laser beam welding AA6061 and Ti-6Al-4V and optimization of welding processes. *Recent Pat Eng* 19(4):E260624231323.
- [13] Bensaid N, Benlamnour M-F, Laksir Y-L, Saadi T, Badji R (2025) Optimization of TIG welding process parameters for joining austenitic stainless steel and copper using Taguchi method. *Adv Sci Technol Res J* 19(1):209–219.
- [14] Sang-il L, Kyu-bak D, Hyeong-jo C (2023) A study on efficiency evaluation for motion parameters of manual welding using data envelopment analysis. *J Weld Join* 41(2):123–131.
- [15] Matlock D-K, Speer J-G, De Moor E, Gibbs P-J (2012) recent developments in advanced high-strength sheet steels for automotive applications: an overview. *JESTECH* 15(1):1–2.
- [16] Shang G, Xu L, Li Z, Zhou Z, Xu Z (2024) Digital-twin-based predictive compensation control strategy for seam tracking in steel sheet welding of large cruise ships. *Robot Comput Integr Manuf* 88:102725.
- [17] Al-Zuhairi H-M, Hamza A-K, Mahdi B-S, Al-Alkawi H-J (2025) Effect of heat treatment on toughness and fatigue behavior of CK45 steel. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 881:012069.

۵. در مجموع، کنترل دقیق سرعت دست در جوشکاری دستی نه تنها یک عامل کیفی در خروجی جوش است، بلکه به عنوان یک فاکتور کلیدی در تضمین طول عمر قطعه و کاهش هزینه‌های نگهداری شناخته می‌شود.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از استادان، پژوهشگران و داوران گرامی که با ارائه نظرات سازنده در ارتقاء کیفیت علمی این مطالعه نقش مؤثری ایفا کردند، ابراز می‌دارند.

### تعارض منافع

نویسندگان گرامی بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع علمی، مالی یا غیرمالی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد و تمامی داده‌ها و تحلیل‌ها با رعایت اصول اخلاق پژوهش ارائه شده‌اند.

### تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی مستقیمی از نهادهای دولتی، خصوصی یا دانشگاهی دریافت نکرده است و هزینه‌های انجام آن توسط نویسندگان تأمین شده‌است.

### ۵- مراجع

- [1] Soto-Diaz R, Vasquez-Carbonell M, Escorcía-Gutiérrez J (2025) A review of artificial intelligence techniques for optimizing friction stir welding processes and predicting mechanical properties. *Eng Sci Technol Int J* 62:101949.
- [2] Wang P-E, Ghassemi-Armaki H, Pour M, Zhao X, Ma J, Sattari K, Carlson B (2025) Applicable and generalizable machine learning for intelligent welding in automotive manufacturing. *Weld World* 1–36.
- [3] da Silva Machado T, Machado I-G (2025) Structural impact on high-strength low-alloy steel structures welded by gas metal arc welding with nickel and steel filler metals. *J Mater Eng Perform* 1–4.
- [4] Zhu C, Wang Z, Zhu Z, Guo J (2025) Design and modeling of pipeline welding robot based on Pieper criterion and integrated intelligent welding system. *Weld World* 1–5.

- analysis of trends and effects. *Eng Fail Anal* 53:36–58.
- [32] Melad M-S, Gebri M-A, Shuaieib F-M, Esmael R-M, El-Hag M-A (2024) An in-depth investigation of TIG welding parameters on hardness and corrosion resistance of 2205 DSS weldments: new DOE parametric studies and optimization. *Int J Eng Res Africa* 69:47–69.
- [33] Choudhary A, Gupta M-K, Kumar M (2019) Investigating the effect of electrode preheating in novel water-cooled advanced submerged arc welding process. *Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des Appl* 233(10):2015–2029.
- [34] Raj S, Biswas P (2023) Experimental investigation of induction preheating effect on microstructure evolution and corrosion behaviour of dissimilar FSW (IN718–SS316L) joints. *J Manuf Process* 95:143–159.
- [35] Turichin G, Tsibulskiy I, Kuznetsov M, Akhmetov A, Mildebrath M, Hassel T (2015) Influence of gap width on geometry of welded joint in hybrid laser-arc welding. *Phys Procedia* 78:14–23.
- [36] Junaidi A, Wilza R, Hendradinata H (2024) Analysis of E7016 electrode heating time and humidity on tensile strength of SS400 welded joints. *Int J Mech Energy Eng Appl Sci* 2(3):48–53.
- [37] Sedehi S-M, Yazdi S-H, Bazleh Z, Boskabadi M, Sistani A (2024) Fabrication of CK45/RGO nanocomposite using machining-chip recycling and spark plasma sintering. *Int J Iron Steel Soc Iran* 20(2):73–80.
- [38] Jannifar A, Ichsan T-A, Nurdin H, Mukhtar F, Wahyudi W (2019) Welding current effect on corrosion rate and hardness of St37 welded joints. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 268:012167.
- [39] Li S, Guan K, Huang X, Wang F, Ji X (2025) Corrosive wear behavior of medium-Mn steel vs 316L stainless steel in 3.5% NaCl. *Surf Sci Technol* 3(1):5.
- [40] Li F, Liu Y-F, Wang Z-L, Fan H-Q, Behnamian Y (2025) Defending against pitting corrosion: insights from potentiostatic pulses on 316L stainless steel in 3.5 wt% NaCl. *Surf Coat Technol* 504:132046.
- [41] Sedehi M, Khosravi M, Yaghoubinezhad Y (2024) Experimental comparison of microstructure and surface properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples produced by PM and SPS methods. *Mech Struct Fluids* 12(5):123–132.
- [42] Abderrahmani S, Chérifi N, Ghanem K (2024) Effect of SMAW welding speed on microstructure and crystal stability of X70 steel using XRD. *Stud Eng Exact Sci* 5(2):e9691.
- [18] Langari J, Aliakbari K, Nejad R-M, Abbasnia S-K (2023) Failure analysis of CK45 steel crankshaft in light truck diesel engine. *Eng Fail Anal* 145:107045.
- [19] Merrill J, Oliphant W-J (2018) Welding challenges in typical connections used in steel pole transmission structures. *Electr Transm Substation Struct* 435–444.
- [20] Sabiruddin K, Bhattacharya S, Das S (2013) Selection of appropriate process parameters for GMAW of medium carbon steel specimens. *Int J Anal Hierarchy Process* 5(2).
- [21] Liu J, Cheng Y, Jing X, Liu X, Chen Y (2024) Prediction and optimization method for welding quality of components in ship construction. *Sci Rep* 14:9353.
- [22] Liu X, Sun Y, Li Y, Li W, Lin B, Pei M (2024) Effect of welding speed on microstructure, mechanical properties, and fatigue failure of Q690D high-strength steel. *Eng Fail Anal* 166:108885.
- [23] Wu Z, Wan J, Zhang Y, Li C, Liu Y, Yang C (2024) Influence of welding speed on nanosecond laser welding of AZ31B Mg alloy and 304 stainless steel. *Opt Laser Technol* 168:109997.
- [24] Yang H, Chen J, Zhao X, Huda N, Midawi A-R, Gerlich A-P (2024) Effect of laser beam wobbling and welding speed in X80 steel wire-fed laser root welds. *J Mater Process Technol* 327:118383.
- [25] Zhao Y-Y, Zhang Y-S, Hu W (2013) Effect of welding speed on microstructure, hardness, and tensile properties in laser welding of AHSS. *Sci Technol Weld Join* 18(7):581–590.
- [26] Jármay K, Farkas J (1999) Cost calculation and optimisation of welded steel structures. *J Constr Steel Res* 50(2):115–135.
- [27] Li S, Hou X, Wang X, Liu Z, Xia Y, Dong H (2023) Weldability of high-entropy alloys: microstructure, mechanical property, and corrosion resistance. *J Manuf Process* 99:209–229.
- [28] Ramamurty U, Jana S, Kawamura Y, Chattopadhyay K (2005) Hardness and plastic deformation in a bulk metallic glass. *Acta Mater* 53(3):705–717.
- [29] Pouranvari M (2018) Understanding factors controlling interfacial failure strength of AHSS resistance spot welds: hardness vs fracture toughness. *Sci Technol Weld Join* 23(6):520–526.
- [30] Zhang H-B, Wang Z-W, Xue P, Li J-H, Wang W-G, Zhang H, Ni D-R, Liu F-C, Xiao B-L, Ma Z-Y (2024) Eliminating heat-affected zone of nuclear heat-resistant steel joint via low-temperature friction stir welding. *Mater Sci Eng A* 916:147340.
- [31] Ossai C-I, Boswell B, Davies I-J (2015) Pipeline failures in corrosive environments – A conceptual

- [55] Sun Y, Pang J, Han Y, Guo W, Li Z (2025) Method for studying transient dielectric behaviour of nonlinear insulating dielectrics via current & open-circuit potential measurements. *Meas* 117024.
- [56] Blasco-Tamarit E, Igual-Muñoz A, Antón J-G, García-García D (2008) Comparison between OCP and imposed-potential tests to evaluate temperature effects on galvanic corrosion of alloy 31-welded alloy 31 in LiBr. *Corros Sci* 50(12):3590–3598.
- [57] Sazou D, Pagitsas M (2006) electrochemical instabilities due to pitting corrosion of iron. *Russ J Electrochem* 42:476–490.
- [58] Yang X, Wang Y, Tong X, Yang N (2022) Strain engineering in electrocatalysts: fundamentals, progress and perspectives. *Adv Energy Mater* 12(5):2102261.
- [59] Tadjikuziev R, Rubidinov S, Mamatqulova S (2024) Advancements in energy-efficient welding production: models and methods for combined workpiece fabrication. *E3S Web Conf* 583:05005.
- [60] Pepe N, Yapp D (2008) Measurements of process efficiency for a range of MIG/MAG welding process. In: 17th International Conference Computer Technology in Welding and Manufacturing, Cranfield, GB, pp 1–11, ISBN 978-1- 903761-07-6 .
- [61] Shinoda T, Hayashi C, Kato Y (2001) Directed plasma fabrication. In: Proceedings of the International Conference of Materials, Helsingor, DK, TIB-RN9585(10), BAM-DS-Proc.13-D076/02, pp 258–267 .
- [62] DuPont JN, Marder AR (1995) Thermal efficiency of arc welding processes. *Weld J* 74:406–416, ISSN 0043-2296.
- [63] Giedt WH, Talerico LN, Fuerschbach PW (1989) GTA welding efficiency: calorimetric and temperature field measurements. *Weld J* 68:28–32, ISSN 0043-2296.
- [64] DIN EN 1011-1 (2009) Welding—recommendations for welding of metallic materials—part 1: General guidance for arc welding; German version EN 1011-1
- [65] SEW 088 (1993) supplemental sheet 2 BWeldable fine grained steels; guidelines for processing, particular for fusion welding<sup>^</sup>
- [66] Haelsig A, Mayr P, Kusch M. Determination of energy flows for welding processes. *Welding in the World*. 2016 Mar;60(2):259-66.
- [67] Shravan C, Radhika NN, Deepak Kumar NH, Sivasailam B (2023) A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*.;10(2):1126-81.
- [43] Singh V-P, Kumar D, Kuriachen B (2024) parametric effect on microstructure evolution, grain size, and mechanical behaviour of FSW AA6061-T6. *J Adhes Sci Technol* 18:1–25.
- [44] Jia L, Cui H, Yang S, Lv S, Xie X, Qu J (2024) Cooling-rate effect on microstructure and segregation in directionally solidified GH4151 superalloy. *Mater Charact* 209:113735.
- [45] Liu X, Sun Y, Li Y, Li W, Lin B, Pei M (2024) Effect of welding speed on microstructure, mechanical properties and fatigue failure of Q690D steel. *Eng Fail Anal* 166:108885.
- [46] Hong X, Huang B, Li T, Chen P, Zheng J, Zhu Y (2024) Effects of welding speed and current on residual stress and deformation of SAF2507/316L plasma arc welding. *J Mater Eng Perform* 33(24):13745–13763.
- [47] Sedehi S-M, Khosravi M, Yaghoubinezhad Y (2021) Mechanical properties and microstructures of RGO-reinforced titanium matrix composites produced by SPS and simple shear extrusion. *Ceram Int* 47(23):33180–33190.
- [48] Aftab M, Aftab A, Butt M-Z, Ali D, Bashir F, Iqbal S-S (2023) Surface hardness of pristine and laser-treated zinc vs indentation load and correlation with crystallite size (W–H, SSP, H–W, Wagner–Aqua models). *Mater Chem Phys* 295:127117.
- [49] Cheng L, Liu C, Han D, Ma S, Guo W, Cai H, et al. (2019) Effect of graphene on corrosion resistance of waterborne inorganic zinc-rich coatings. *J Alloys Compd* 774:255–264.
- [50] Taheridoustabad I, Khosravi M, Yaghoubinezhad Y (2021) Fabrication of GO/RGO/TiC/TiB<sub>2</sub> coating on Ti-6Al-4V by electrical discharge coating and tribological evaluation. *Tribol Int* 156:106860.
- [51] Abdel-Rahman A-S, Sabry Y-A (2024) Micro-strain distribution inside nanoparticle structures. *Int J Non-Linear Mech* 161:104670.
- [52] Konar R, Maiti S, Shpigel N, Aurbach D (2023) Reviewing failure mechanisms and modification strategies to stabilize high-voltage LiCoO<sub>2</sub> cathodes beyond 4.55 V. *Energy Storage Mater* 63:103001.
- [53] Shirazi H, Wang S, Chen W, Eadie R (2024) Pipeline circumferential corrosion-fatigue failure under bending residual stress in near-neutral pH. *Eng Fail Anal* 166:108887.
- [54] Akinwamide S-O, Venter A, Akinribide O-J, Babalola B-J, Andrews A, Olubambi P-A (2022) Residual stress impact on corrosion behaviour of hot and cold-worked 2205 duplex stainless steel: XRD study. *Eng Fail Anal* 131:105913.