

## بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر جنبه‌های ریزساختاری و سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد

مسعود سبزی\*، رقیه کلانتری پور

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دزفول، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۱۱/۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۱۲/۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۱۲/۷

**چکیده** در این پژوهش، به بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر جنبه‌های ریزساختاری و سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا چهار عدد ورق آستنیت شده به ضخامت ۲mm از فولاد هادفیلد تهیه شد. سپس، طرح اتصال با دو پخ V و X شکل تهیه گردید و برای جوشکاری آنها از فرآیند SMAW استفاده شد. در مرحله بعد، از روش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای بررسی رفتار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری شده در محلول ۳/۵NaCl استفاده شد. همچنین برای بررسی ریزساختار فلز جوش در اتصالات جوشکاری شده از میکروسکوپ نوری، برای آنالیز فازهای تشکیل شده در ریزساختار از پراش پرتو ایکس و برای تعیین سازوکار خوردگی از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که با به‌کارگیری طرح اتصال حاوی پخ V شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ X شکل در اتصالات جوش فولاد هادفیلد، ریزساختار فلز جوش دانه‌ریزتر شده و رسوب‌های کاربیدی زیاد شده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که پخ V شکل نسبت به پخ X شکل منجر به کاهش مقاومت خوردگی و تبدیل سازوکار خوردگی فلز جوش از خوردگی یکنواخت به خوردگی موضعی میکروگالوانیکی در اتصالات جوش فولاد هادفیلد گردیده است.

**کلمات کلیدی:** فولاد هادفیلد، سازوکار خوردگی، جنبه‌های ریزساختاری، هندسه‌ی طرح اتصال، اتصالات جوشکاری.

## Investigation of Joints Design Geometry Effects on the Microstructural Aspects and Corrosion Mechanism of Weld Metal in the Hadfield Steel Welding Joints

Masoud Sabzi\*, Roghayeh Kalantaripour

Islamic Azad University, Dezful Branch, Young Researchers and Elite Club, Dezful, Iran

**Abstract** In this study, the effect of joints design geometry on the microstructural aspects and corrosion mechanism of weld metal in the Hadfield steel welding joints was investigated. For this purpose, initially 4 austenitized sheets of Hadfield steel with 2mm thickness prepared. Then joints design with two chamfered V and X forms were prepared and SMAW process was used for welding. In the next step, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy methods were used to evaluate corrosion behavior of welded joints weld metal in the 3.5% NaCl solution. Also optical microscopy method was used to evaluate the microstructure of weld metal, Corrosion morphology of weld metal were investigated by scanning electron microscopy and X-ray diffraction was used for the analysis of phases formed in the microstructure of weld metal. The results indicated that with using joints design containing chamfered V-shape in comparison with joints design containing chamfered X-shape in the Hadfield steel welded joints, resulted microstructures consisted from smaller grains and more carbide precipitates. The results indicated that V-shaped chamfers in comparison with X-shaped chamfer led to reduction in corrosion resistance and changed weld metal corrosion mechanism from uniform corrosion to localized micro-galvanic corrosion in the Hadfield steel weld joints.

**Keywords:** Hadfield steel, corrosion mechanism, microstructural aspects, joints design geometry, welding joints.

## ۱- مقدمه

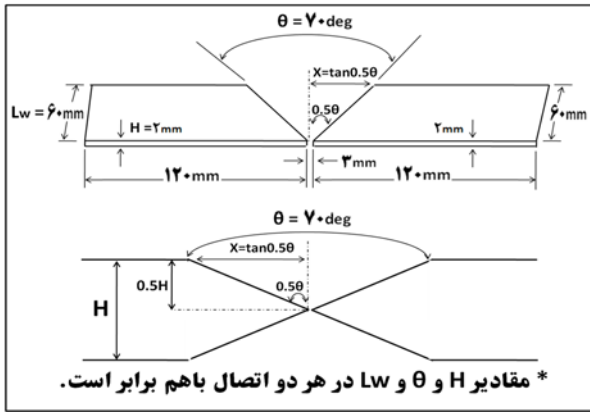
ورق‌های فولاد هادفیلد، منجر به کاهش مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود. این محققین دلیل این امر را افزایش تشکیل کاربیدهای پیوسته و خوشه‌ای شکل در اثر افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری بیان نموده‌اند. در همین زمینه سبزی و کلانتری پور [۱۳] با مطالعاتی که بر روی تأثیر حرارت ورودی فرآیند جوشکاری بر روی خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد انجام دادند، گزارش نمودند که افزایش حرارت ورودی فرآیند جوشکاری منجر به کاهش ضربه‌پذیری و کرنش شکست اتصال جوش فولاد هادفیلد می‌شود. در تحقیقات دیگری که توسط ترجم‌نژاد و همکارانش انجام شد [۱۴]، گزارش شده است که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد دوفازی ۲۲۰۵ منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش می‌شود. این محققین دلیل این امر را کاهش درصد حجمی فریت فلز جوش در اثر افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری توجیه نموده‌اند.

مرسوم‌ترین روشی که برای جوشکاری فولاد هادفیلد مورد استفاده در خطوط ریلی به کار گرفته می‌شود، روش جوشکاری با الکتروود دستی (SMAW<sup>۲</sup>) بوده و برای جوشکاری این فولادها الکتروودهای مناسب حاوی منگنز بالا به صورت تجاری موجود هستند [۱۳]. با توجه به حساسیت فولاد هادفیلد به حرارت، تحقیقات زیادی در رابطه با جوش‌پذیری و قابلیت جوشکاری این فولاد با الکتروودهای مختلف صورت گرفته است [۱۵]. کوریل-رینا<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۶] به بررسی تأثیر نرخ خنک‌شدن بر ساختار و سختی منطقه‌ی متأثر از حرارت پرداختند. این محققان گزارش نمودند که با کاهش نرخ خنک‌شدن، میزان میکروسختی منطقه‌ی متأثر از حرارت افزایش می‌یابد.

باتوجه به اینکه تخریب قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد هادفیلد در شرایط سرویس‌دهی بسیار پرهزینه است، لذا در این پژوهش لازم دیده شد که به بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر جنبه‌های ریزساختاری و سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد

فولاد هادفیلد یک آلیاژ غیرمغناطیسی تشکیل شده از آهن، ۱-۱/۴ درصد وزنی کربن و ۱۰-۱۴ درصد وزنی منگنز می‌باشد که دارای مقاومت بسیار خوبی در برابر سایش است. اولین فولاد آستنیتی منگنزداری که دارای حدود ۱/۲ درصد وزنی کربن و ۱۲ درصد وزنی منگنز بود، توسط رابرت هادفیلد<sup>۱</sup> در سال ۱۸۸۲ میلادی تهیه شد. فولاد آستنیتی پرمنگنز از دسته فولادهای پرآلیاژ می‌باشند که معروف‌ترین آنها به نام فولاد هادفیلد است که به دلیل انعطاف‌پذیری خوب، کارسختی بالا و مقاومت عالی در برابر سایش کاربردهای گسترده‌ای در صنایع گوناگون نظیر صنایع سیمان، معدن، راه‌سازی و راه‌آهن دارد [۲ و ۱].

یکی از عناصری که تأثیر آن بر خواص و ریزساختار فولاد هادفیلد مورد توجه قرار گرفته است، عنصر تیتانیم است. استفاده از عنصر تیتانیم برای خنثی کردن اثر فسفر مورد توجه قرار گرفته است. این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، میزان کربن محلول در آستنیت را کاهش داده و در نتیجه، خواص مکانیکی فولاد را به میزان زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. حضور تیتانیم باعث بهبود ساختار قطعه پس از انجماد می‌شود (به دلیل کاربیدزا بودن، ساختار را ریزدانه می‌کند). با ایجاد مقاومت در برابر تردی (در مقادیر کمتر از ۰/۱ درصد وزنی تیتانیم)، حساسیت نسبت به سیکل عملیات حرارتی در قطعه کاهش یافته و بنابراین، قطعه را از خطر ترک برداشتن در طول عملیات حرارتی محافظت می‌کند [۶ - ۳]. اگرچه این عنصر با ایجاد کاربیدهای پایدار، باعث افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی فولاد هادفیلد شده ولی از طرفی هم با ایجاد کاربیدهای پایدار TiC، باعث کاهش چقرمگی آن می‌شود [۷]. بررسی‌ها نشان داده است که پارامترهای فرآیند جوشکاری تأثیر زیادی بر رفتار خوردگی و ریزساختار اتصالات جوشکاری فولادها دارد [۸ - ۱۰]. یکی از این پارامترها میزان حرارت ورودی است که در حین فرآیند جوشکاری به قطعات وارد می‌شود [۱۱]. در تحقیقاتی که توسط سبزی و همکارانش صورت گرفته [۱۲]، گزارش شده است که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری



شکل ۱. شماتیکی از طرح اتصال برای هر دو پخ X و V شکل.

حرارت ورودی محاسبه شده مطابق با فرمول ۱ و کلیه پارامترهای جوشکاری در جدول ۲ گزارش شده است. لازم به ذکر است که پس از پایان فرآیند جوشکاری، ورق‌های اتصال داده شده در هوا سرد شدند. هم‌چنین ترکیب شیمیایی الکترودهای مورد استفاده در این پژوهش توسط طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شده و در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۲. پارامترهای فرآیند جوشکاری SMAW برای جوشکاری

ورق‌های فولاد هادفیلد.

فرآیند جوشکاری	سرعت، میلی‌متر بر دقیقه	جریان، آمپر	ولتاژ، ولت	حرارت ورودی، کیلوژول بر میلی‌متر
SMAW	۲۵	۱۵۰	۲۰	۵/۴

جدول ۳. آنالیز شیمیایی الکتروده مورد استفاده برحسب درصد وزنی.

عنصر	کربن	منگنز	نیکل	سیلیسیم	فسفر	آهن
میزان	۰/۷۲	۱۲/۵۳	۳/۸۹	۰/۹۴	۰/۰۲	بقیه

برای بررسی ریزساختار فلز جوش اتصالات جوش، ورق‌های اتصال داده شده با استفاده از سمپادهای مختلف به روش تر آماده‌سازی شده و برای حکاکی کردن آنها از محلول نایتال دو درصد استفاده گردید و در نهایت، ریزساختارهای حاصل توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. به منظور اندازه‌گیری میزان رسوبات در فلز جوش اتصالات جوش از نرم‌افزار Image J و برای بررسی اندازه دانه‌های این منطقه از نرم‌افزار Image Analyzer استفاده گردید. هم‌چنین جهت

پرداخته شود که در پژوهش‌های پیشین به این موضوع پرداخته نشده است.

## ۲- روش تحقیق

فولاد مورد استفاده در این پژوهش، فولاد آستینیتی منگنزدار هادفیلد ASTM A-۱۲۸ [۱۷] بود. برای این منظور، ابتدا چهار عدد ورق آستینیتی شده (در دمای ۱۰۰۰°C) از فولاد هادفیلد به ضخامت ۲mm تهیه شده و سپس، ترکیب شیمیایی آنها توسط دستگاه طیف‌سنجی نشری جرقه‌ای بررسی شد و در جدول ۱ گزارش داده شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی ورق‌های فولاد هادفیلد تهیه شده برحسب درصد وزنی.

عنصر	C	Mn	Si	P	Fe
ASTM A-128	۰/۱۴	۱۰-۱۴	۱max	۰/۰۷max	بقیه
ورق‌های تهیه شده	۱/۲۵	۱۲/۷۲	۰/۵۳	۰/۰۲۲	بقیه

سپس، ورق‌های تهیه شده توسط دستگاه فرز با زاویه ۳۵ درجه به دو صورت V و X شکل پخ زده شد تا آماده جوشکاری شوند. شماتیک طرح هر دو اتصال در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جهت اتصال لب به لب ورق‌های پخ زده شده با شیپار V و X شکل، از استاندارد AWS B2.1 [۱۸] بهره گرفته شد. سپس، برای جوشکاری ورق‌های تهیه شده از روش جوشکاری با الکتروده دستی (SMAW) با مقدار حرارت ورودی ۵/۴kJ/mm و هم‌چنین الکترودهای منگنزدار به قطر ۲mm با کد استاندارد AWSA5.13 استفاده شد. برای محاسبه‌ی حرارت ورودی به قطعه کار از رابطه‌ی زیر استفاده گردید [۱۹]:

$$Q = \eta (60VI / 1000S) \quad (۱)$$

که در این فرمول  $\eta$  ضریب ثابتی بوده و برای روش جوشکاری با الکتروده دستی برابر با ۰/۷۵ است. هم‌چنین  $Q$  حرارت ورودی به قطعه کار برحسب کیلوژول بر میلی‌متر،  $V$  ولتاژ برحسب ولت،  $I$  شدت جریان برحسب آمپر و  $S$  سرعت جوشکاری برحسب میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱ مشاهدات ریزساختاری و آنالیز فازی

شکل ۲، تصاویر متالوگرافی تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری از فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو اتصال، فلز جوش شامل زمینه آستنیتی به همراه مقادیر مختلفی از رسوبات می‌باشند. دلیل زمینه آستنیتی را می‌توان به حضور مقادیر بالای کربن و منگنز اثبات نمود. هم‌چنین منگنز از تبدیل آستنیت به مارتنزیت در دماهای پایین جلوگیری می‌کند. تعدادی از محققین [۲۰]، گزارش نمودند که با افزایش منگنز در آلیاژهای آهن- منگنز، دمای شروع مارتنزیت به میزان بسیار زیادی کاهش می‌یابد، به طوری که در آلیاژهای پرمنگنز یک زمینه کامل آستنیتی را می‌توان مشاهده نمود. از تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پیخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ V شکل، دارای میزان رسوب کمتر و اندازه دانه‌های درشت‌تری می‌باشد. بررسی اندازه دانه‌های فلز جوش هر دو اتصال توسط نرم‌افزار Image Analyzer که در شکل ۲ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که استفاده از اتصال جوشکاری موجود با پیخ V شکل نسبت به اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ X شکل منجر به کاهش اندازه دانه‌های فلز جوش از ۱۰۹٫۷ به ۸۸٫۵ $\mu\text{m}$  شده است زیرا اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ V شکل دارای میزان رسوب بیشتری بوده و ذرات رسوبی ترکیبات سختی هستند که جلوی حرکت مرز دانه‌ها را گرفته و از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری می‌کنند.

درواقع، در اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پیخ X شکل، هندسه‌ی طرح اتصال منجر به کاهش تشکیل ذرات کاربیدی شده است. برای بررسی میزان رسوبات، میزان ذرات رسوبی به وسیله نرم‌افزار Image J برای فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری اندازه‌گیری و در شکل ۳ گزارش داده شده است. در این شکل هم مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پیخ X شکل، دارای ۷٫۶ درصد رسوب می‌باشد در حالی که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پیخ V شکل، دارای ۱۹٫۳ درصد رسوب است.

بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هر دو اتصال از آنالیز پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) استفاده گردید.

برای تهیه‌ی نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش‌های خوردگی، نمونه‌ای به ابعاد  $2\text{mm} \times 18 \times 18$  از هر اتصال جوشکاری شده بریده شد و پس از اتصال سیم مسی به آنها، به صورت سرد مانت گردید. سپس، نمونه‌های تهیه شده با سمباده‌های مختلف به روش تر و پولیش پرداخت شد تا سطحی بدون آلودگی به دست آید. در این مرحله یک طرف نمونه‌ی تهیه شده توسط سیم مسی به گیره‌ی دستگاه متصل گردید و طرف دیگر که حاوی فلز جوش بود، به درون محلول  $3/5\text{NaCl}$  فرو برده شد. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی فلز جوش اتصالات جوش فولاد هادفیلد در محلول  $3/5\text{NaCl}$ ، پس از آماده سازی نمونه‌های موردنیاز برای آزمایش‌های خوردگی، ابتدا هر نمونه در پتانسیل مدار باز به مدت زمان نیم ساعت غوطه‌ور شد تا به حالت پایدار برسد. ابتدا آزمایش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز و با به‌کارگیری دامنه‌ی  $10\text{mV}$  در محدوده فرکانسی  $10\text{mHz}$  --  $100\text{kHz}$  اعمال شد. سپس، آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محدوده  $500\text{mV}$  تا  $1000\text{mV}$  + نسبت به پتانسیل مدار باز و با نرخ روبش  $0.001\text{V/s}$  انجام شد.

لازم به ذکر است که آزمایش‌های خوردگی با استفاده از پیل استاندارد سه الکترودی، شامل الکترود مرجع  $\text{Ag/AgCl}$ ، الکترود کمکی پلاتین و هم‌چنین از نمونه‌های تهیه شده از اتصالات جوشکاری شده به عنوان الکترود کار، انجام شدند و سل مذکور به دستگاه پتانسیواستات - گالوانواستات (Autolab) مدل  $302\text{N}$  PGStat متصل گردید. هر دو آزمایش خوردگی مورد استفاده، در دمای  $25^\circ\text{C}$  انجام شد و برای اطمینان از به دست آمدن نتایج دقیق، هر آزمایش خوردگی سه بار تکرار شد. به منظور بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، از سطوح خورده شده‌ی فلز جوش هر دو اتصال، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصاویری تهیه شد.

1 X-Ray Diffraction (XRD)

2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

$$(V_{WM}) \text{ V-shaped chamfer} = L_w \times H \times H \tan \frac{\theta}{2} = 60 \times 2 \times 2 \tan 35^\circ = 168 \text{mm}^3$$

$$(V_{WM}) \text{ X-shaped chamfer} = 2 [L_w \times 0.5H \times 0.5H \tan \frac{\theta}{2}] = 2 [60 \times 1 \times 1 \tan 35^\circ] = 84 \text{mm}^3$$

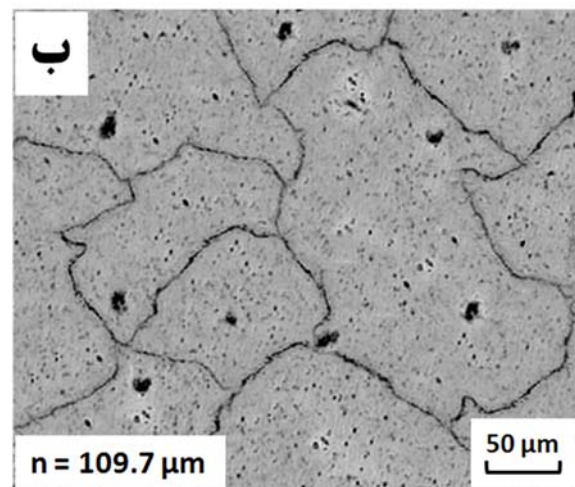
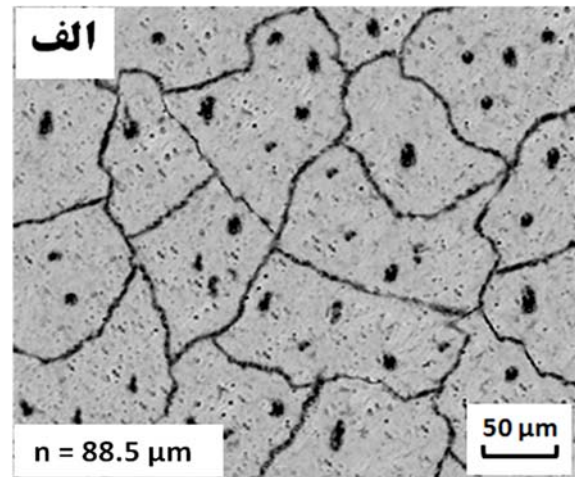
$$(V_{WM}) \text{ X-shaped chamfer} \div (V_{WM}) \text{ V-shaped chamfer} = 0.5$$

$$(V_{WM}) \text{ V-shaped chamfer} = 2 (V_{WM}) \text{ X-shaped chamfer}$$

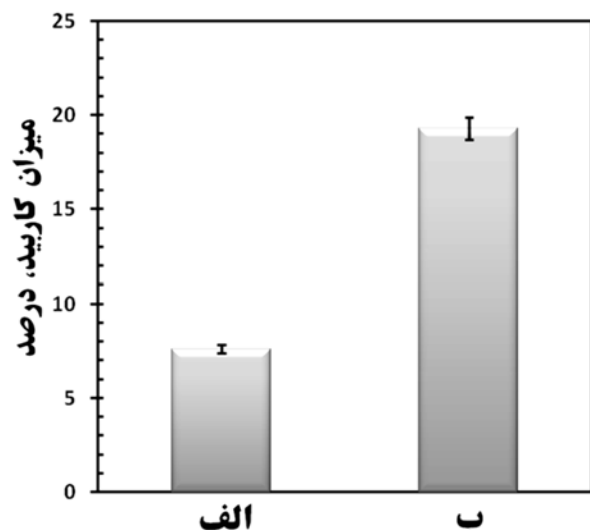
باتوجه به محاسبه‌ی حجم فلز جوش، مشاهده می‌گردد که حجم فلز جوش در اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ V شکل حدود دو برابر حجم فلز جوش در اتصال جوشکاری موجود توسط پخ X شکل است. لذا انتظار است که الکتروود مصرفی برای ایجاد اتصال با پخ V شکل نیز بیشتر باشد. در نتیجه، هرچقدر ماده مصرفی برای ایجاد اتصال بیشتر باشد، دمای اتصال هم افزایش یافته و این امر منجر به افزایش تشکیل رسوبات کاربیدی در اتصالات جوش فولادهای پرکربن نظیر فولاد هادفیلد می‌شود [۱۲ و ۱۳].

بنابراین، در اثر افزایش دمای اتصال جوش فولاد هادفیلد (به دلیل استفاده از طرح اتصال با پخ V شکل)، دمای اتصال جوشکاری شده افزایش یافته و فلز جوش پس از پایان فرآیند جوشکاری برای رسیدن به دمای محیط و عبور از محدوده دمایی تشکیل کاربید نیاز به زمان بیشتری دارد (محدوده دمایی تشکیل کاربید برای فولاد هادفیلد با ۱/۲C٪ از ۴۰۰ تا ۹۰۰°C می‌باشد [۱۱]). بنابراین، فلز جوش به دلیل طولانی‌تر شدن زمان سرد شدن، به کربن و عنصر کاربیدزایی مثل منگنز فرصت می‌دهد تا با هم‌دیگر واکنش داده و کاربیدهای منگنز را تشکیل دهند.

برای بررسی این موضوع، پس از پایان فرآیند جوشکاری، دمای فلز جوش در بازه‌های زمانی مختلف توسط دستگاه پیرومتر غیرتماسی پرتابل اندازه‌گیری و در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌گردد که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری موجود توسط پخ X شکل، محدوده دمایی تشکیل کاربید را در مدت زمان بیشتری سپری می‌کند. در نتیجه، در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پخ V شکل، زمان بیشتری به عناصر کاربیدزا جهت تشکیل رسوبات کاربیدی و در ادامه کاهش اندازه دانه‌های آستنیت داده شده است.

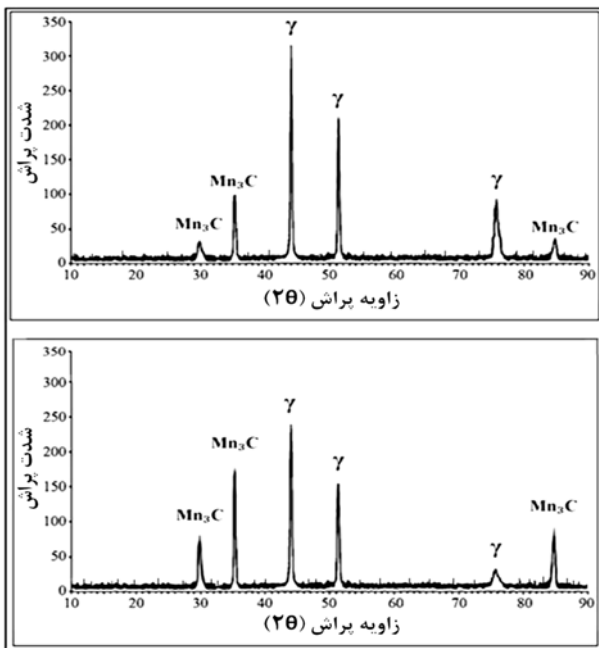


شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ از فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف) شکل V، ب) شکل X.



شکل ۳. تعیین توزیع کاربید توسط نرم افزار Image J در فلز جوش اتصالات جوشکاری ایجاد شده با پخ: الف) شکل X، ب) شکل V.

برای بررسی این موضوع (افزایش میزان رسوبات) به محاسبه‌ی حجم فلز جوش در هر دو اتصال مورد آزمایش پرداخته می‌شود:



شکل ۵. الگوهای حاصل از آنالیز XRD از فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ: الف) شکل X، ب) شکل V.

زیرا همانطور که از تصاویر متالوگرافی مشاهده گردید (شکل ۲)، استفاده از اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ V شکل منجر به افزایش تشکیل میزان رسوبات کاربیدی و تعداد مرزدهانه‌ها در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد شده بود. در واقع، نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک ارتباط مستقیمی با تغییرات ریزساختاری (اندازه دانه و میزان ذرات کاربیدی) ایجاد شده در فلز جوش در اثر طراحی‌های مختلف اتصالات جوشکاری برای اتصال دادن ورق‌های فولاد هادفیلد دارد.

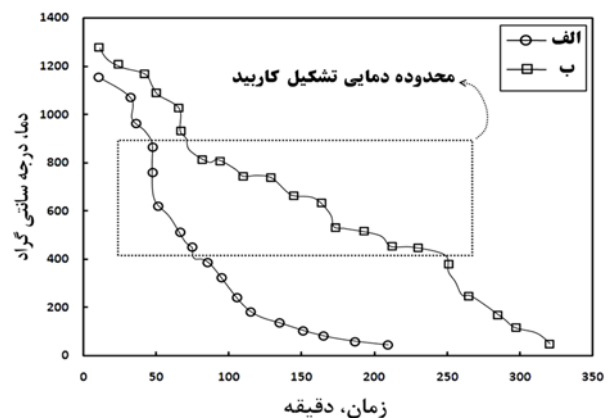
بنابراین، زمانی که از اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ V شکل به جای اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ X شکل استفاده می‌شود، تشکیل کاربیدها و تعداد مرزدهانه‌ها افزایش یافته و این عوامل به دو دلیل منجر به تشدید خوردگی می‌شوند [۱۲]:

۱- مرزدهانه‌ها محل‌های پراثری بوده که از نظر شیمیایی فعال‌تر هستند و تمایل به خوردگی موضعی را افزایش می‌دهند. ۲- زمانی که ذرات کاربیدی نجیب‌تر در کنار زمینه فعال قرار می‌گیرند، زوج الکتروشیمیایی تشکیل داده و باعث تضعیف شدن مقاومت خوردگی خواهد شد.

در مجموع، نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک حکایت از این دارد که استفاده از اتصال جوشکاری ایجاد شده

برای بررسی رسوبات تشکیل شده در فلز جوش هر دو اتصال از آنالیز XRD استفاده و نتایج آن در شکل ۵ گزارش شده است. از شکل ۵ هم ملاحظه می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده توسط پیخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری موجود توسط پیخ V شکل، از میزان کاربید کمتری برخوردار است. هم‌چنین کاربیدهای تشکیل شده در هر دو فلز جوش اتصال جوشکاری، کاربیدهای منگنز از نوع  $Mn_3C$  بوده و فاز غالب (فاز زمینه)، آستنیت می‌باشد [۱۵ و ۱۰].

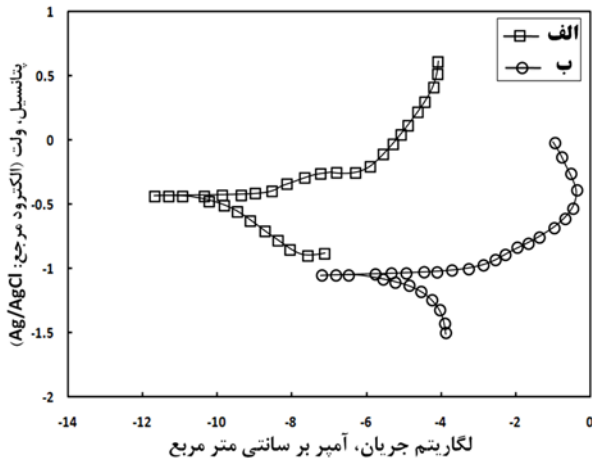
نتایج حاصل از مشاهدات ریزساختار و آنالیز فازی در این پژوهش با نتایج کوریل-رینا [۱۴ و ۱۳]، سبزی [۱۳ و ۱۲] و همکارانشان شباهت دارد. این محققین در تحقیقات جداگانه‌ای گزارش دادند که افزایش دمای اتصالات جوشکاری منجر به افزایش میزان رسوبات کاربیدی و کاهش اندازه دانه‌های آستنیت در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی منگنزدار هادفیلد می‌شود.



شکل ۴. نرخ سرد شدن فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ: الف) شکل X، ب) شکل V.

### ۲-۳ آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

در شکل ۶ نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و در جدول ۴ نتایج مربوط به این آزمایش نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری موجود با پیخ V شکل از مقاومت خوردگی بالاتر، پتانسیل خوردگی نجیب‌تر و نرخ خوردگی کمتری برخوردار است.



شکل ۶. نمودارهای مربوط به آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حداقل سه بار تکرارپذیری: الف) فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل، ب) فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل.

با پیچ X شکل به جای استفاده از اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل، استعداد به خوردگی موضعی در فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد را کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نتایج حاصل از پژوهش سبزی و همکارانش [۱۳ و ۱۲] شباهت دارد. آقای سبزی و همکارانش پیش از این گزارش داده بودند که حضور شبکه پیوسته‌ی کاربید منگنز در مرزخانه‌های فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد منجر به کاهش مقاومت خوردگی اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد می‌شود. این محققین هم-چنین گزارش دادند که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری فولاد هادفیلد منجر به افزایش میزان رسوبات فلز جوش شده و در نتیجه، این عمل (افزایش حرارت ورودی) منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش می‌شود.

جدول ۴. نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در حداقل سه بار تکرارپذیری.

فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با	جریان خوردگی، میکروآمپر بر سانتی متر مربع	پتانسیل خوردگی، میلی‌ولت (الکتروود مرجع: Ag/AgCl)	مقاومت پلاریزاسیون، اهم. سانتی متر مربع	نرخ خوردگی، میلی متر بر سال
پیچ X شکل	$62 \pm 5$	$-494 \pm 10$	$242 \pm 5$	$0.3002 \pm 0.01$
پیچ V شکل	$8231 \pm 5$	$-1147 \pm 10$	$48 \pm 5$	$1.9211 \pm 0.01$

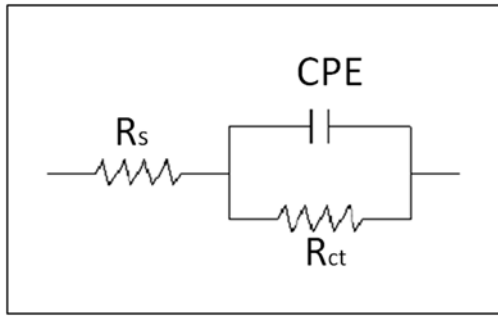
محلول ( $R_s$ )، المان ثابت فازی (CPE) و مقاومت انتقال بار ( $R_{ct}$ ) می‌باشد.

جدول ۵ نتایج EIS را با توجه به مدار معادل نشان داده در شکل ۸ را نمایش می‌دهد. در این جدول هم مشاهده می‌شود که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل، مقاومت خوردگی و ظرفیت خازنی بالاتری دارد. دلیل این امر آن است که استفاده از اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل به وسیله‌ی کاهش تشکیل رسوبات و مرزخانه‌ها، شرایط را برای بهبود مقاومت خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری شده‌ی فولاد هادفیلد محیا کرده است (باتوجه به کاهش عوامل تشدیدکننده خوردگی موضعی). تشدید خوردگی موضعی در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد به دلیل افزایش میزان کاربیدها و تعداد مرزخانه‌ها با نتایج حاصل از پژوهش سبزی و همکارانش شباهت دارد [۱۳ و ۱۲]. آقای سبزی و همکارانش پیش از این گزارش داده بودند که افزایش حرارت ورودی در فرآیند جوشکاری

### ۳-۳ آزمایش طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

شکل ۷ نمودارهای نایکویست مربوط به آزمایش طیف-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول  $0.3/5\text{NaCl}$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌شود، فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل، مقاومت امپدانس واقعی بیشتری دارد. در مجموع با مقایسه نمودارهای نایکویست در شکل ۷، مشاهده می‌شود که قطر نیم‌دایره نمودارهای نایکویست که نمادی از مقاومت پلاریزاسیون است، برای فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل نیز بیشتر است. هم‌چنین نتایج مقاومت خوردگی حاصل از آزمایش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با نتایج آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک هم‌خوانی دارند.

در شکل ۸ مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه‌ی پارامترهای طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داده شده است [۲۱]. مدار معادل نشان داده متشکل از یک مقاومت

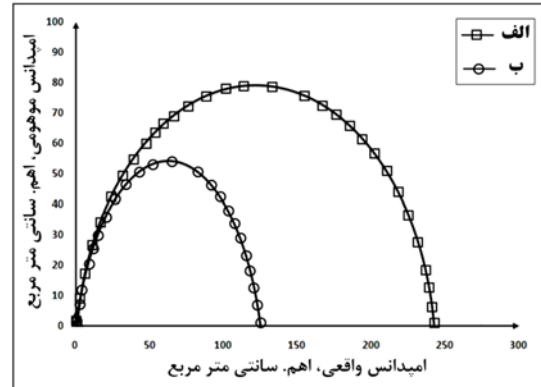


شکل ۸. مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای EIS.

### ۳-۴ مورفولوژی خوردگی فلز جوش

جهت بررسی تأثیر هندسه‌ی طرح اتصال بر سازوکار خوردگی فلز جوش در اتصالات جوشکاری فولاد آستینیتی منگن‌دار هادفیلد، پس از پایان آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطوح خورده شده‌ی فلزات جوش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری تهیه و در شکل ۹ نشان داده شده است.

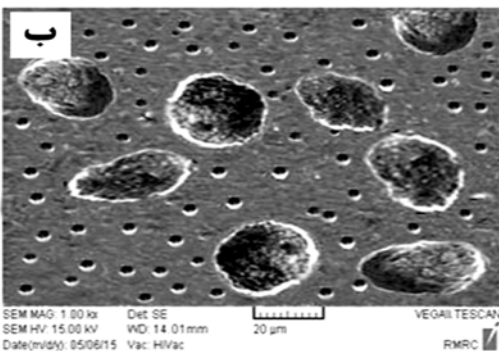
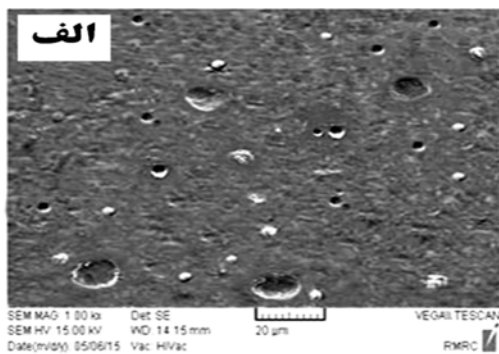
ورق‌های فولاد هادفیلد منجر به کاهش مقاومت خوردگی فلز جوش اتصال مذکور می‌شود. این محققین دلیل این رخداد را افزایش تشکیل میزان رسوبات فلز جوش در اثر افزایش حرارت ورودی اثبات نمودند.



شکل ۷. نمودار نایکوئیست مربوط به آزمایش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در حداقل سه‌بار تکرارپذیری: الف) فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل، ب) فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل.

جدول ۵. نتایج آزمایش طیف‌سنجی امپدانس شیمیایی با حداقل سه‌بار تکرارپذیری.

المان فاز ثابت	مقاومت انتقال بار، اهم. سانتی متر مربع	ظرفیت خازنی، میکروفارادی بر سانتی متر مربع	مقاومت محلول، اهم. سانتی متر مربع	فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با
۰٫۹۵ ± ۰٫۰۱	۲۴۵٫۹۴	۴۲٫۰۰۱۷	۰٫۰۲۰۵	پیچ X شکل
۰٫۸۸ ± ۰٫۰۱	۱۲۷٫۸۸	۳۰٫۲۰۷۲	۰٫۰۲۰۲	پیچ V شکل



شکل ۹. تصاویر SEM از سطح خوردگی: الف) فلز جوش اتصال

جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل، ب) فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل.

همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، در سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ X شکل نسبت به سطح خوردگی فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل، یکسری حفرات درشت در سطح مشاهده می‌شود. چون در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل، ذرات کاربیدی به‌صورت شبکه‌ای پیوسته تجمع یافته و حالت خوشه‌ای شکل به خود گرفته‌اند و همین کاربیدها از حرکت مرزدهانه‌ها جلوگیری کرده و منجر به کوچک شدن دانه‌ها و افزایش تعداد مرزدهانه‌ها شده‌اند. لذا حضور شبکه‌ی پیوسته‌ی کاربید و تعداد بالای مرزدهانه در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پیچ V شکل، شرایط را برای تشکیل میکروپیل‌های گالوانیکی و تشدید خوردگی موضعی میکروگالوانیکی فراهم نموده است.



میکروگالوانیکی به خوردگی یکنواخت تغییر می دهد.

## مراجع

- Barannikova, S.A., Li, Y., Malinovsky, A., Pestsov, D., Study of Localized Plastic Deformation of Hadfield Steel Single Crystals Using Speckle Photography Technique, *Key Engineering Materials*, 683(2016) 84-89.
- Limooei, M. B. and Hosseini, S., Optimization of Heat Treatment in Manganese Steel by Taguchi Method, *Applied Mechanics and Materials*, 598 (2014) 43-46.
- Lindroos, M. and et al., The deformation, strain hardening, and wear behavior of chromium-alloyed Hadfield steel in abrasive and impact conditions, *Tribology Letters*, 57 (2015) 1-11.
- Magdaluyo, E.R. and et al., Gouging Abrasion Resistance of Austenitic Manganese Steel with Varying Titanium, *Proc. of the World Congress on Engineering 2015*, London, English.
- Limooei, M.B. and Hosseini, S., Optimization of properties and structure with addition of titanium in hadfield steels, *Proc. Conf. of Metal*, 2012, Brono, Czech Republic.
- Srivastava, A.K. and et al., Corrosion Behaviour of TiC-Reinforced Hadfield Manganese Austenitic Steel Matrix In-Situ Composites, *O. J. Metal*, 5 (2015) 11-17.
- Najafabadi, V.N., Amini, K., Alamdarlo, M.B., Investigating the effect of titanium addition on the wear resistance of Hadfield steel, *Metallurgical Research & Technology*, 111 (2014) 375 - 382.
- Ervina Efzan, M.N., Vigram Kovalan, K., Suriati, G., A review of welding parameter on corrosion behavior of Aluminum, *International Engineering and Science journal*, 1 (2012) 17-22.
- Afolabi, A.S., Effect of Electric Arc Welding Parameters on Corrosion Behaviour of Austenitic Stainless Steel in Chloride Medium, *AU Journal of Technology*, 11 (2008) 171-180.
- Kumar, S., Shahi, A.S., Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints, *Materials & Design*, 32 (2011) 3617-3623.
- Dong, H., Hao, X., Deng, D., Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Joint, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 3 (2014) 138-146.
- سبزی، م.، معینی فر، ص. و نجفی بیرگانی، ا.، بررسی تأثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW، *مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران*، ۱ (۱۳۹۴) ۲۳-۱۳.
- سبزی، م. و کلانتری پور، ر.، بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش فولاد هادفیلد در فرآیند SMAW، *مجله علوم و فناوری جوشکاری ایران*، ۲ (۱۳۹۵) ۸۸-۷۸.
- ترحم نژاد، م.ع.، دهملانی، ر. و معینی فر، ص.، بررسی تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خوردگی اتصالات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵، *مجله مواد نوین*، ۵ (۱۳۹۳) ۱۱۰-۹۵.
- Mendez, J. and et al., Weldability of austenitic manganese steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004) 596-602.
- Curriel-Reyna, E. and et al., Influence of cooling rate on

ذرات کاربیدی نقش کاتد و زمینه‌ی آستنیتی نقش آن را در خوردگی موضعی میکروگالوانیکی ایفا می کنند [۲۳ و ۲۲ و ۱۲]. در طرف دیگر سطح خورده شده‌ی فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل خبری از حفرات درشت نیست و تعدادی حفره کوچک و پراکنده در سطح دیده می شود که نشان از تغییر سازوکار خوردگی از خوردگی موضعی به خوردگی یکنواخت در فلز جوش اتصال جوشکاری فولاد هادفیلد دارد. در مجموع میزان خوردگی سطح (تعداد و عمق حفره‌های ایجاد شده) در فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری، با نتایج مقاومت و نرخ خوردگی حاصل از آزمایش‌های خوردگی مطابقت دارد.

## ۴- نتیجه گیری

۱- مشاهدات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری نشان داد که فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل، دارای میزان رسوب کمتر و اندازه دانه‌های آستنیت بزرگتری است.

۲- الگوهای حاصل از آنالیز XRD، بیانگر تشکیل کاربیدهای منگنز  $Mn_3C$  در فلز جوش هر دو اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X و V شکل بودند. همچنین الگوهای حاصل از آنالیز XRD، مشاهدات میکروسکوپ نوری در خصوص افزایش تشکیل کاربید در فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل را تایید نمود.

۳- نتایج آزمایش‌های پلازمااسیون پتانسیودینامیک و تیپ-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی دلالت بر مقاومت خوردگی بالاتر فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ X شکل نسبت به فلز جوش اتصال جوشکاری ایجاد شده با پخ V شکل داشت. زیرا طرح اتصال حاوی پخ X شکل عوامل تشدیدکننده‌ی خوردگی را در فلز جوش کاهش داده بود.

۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح خورده شده‌ی فلز جوش اتصالات جوشکاری شده نشان داد که طرح اتصال حاوی پخ X شکل نسبت به طرح اتصال حاوی پخ V شکل، سازوکار خوردگی فلز جوش اتصالات جوشکاری فولاد هادفیلد را از خوردگی موضعی

- the structure of heat affected zone after welding a high manganese steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 20 (2005) 813-822.
17. Annual book of ASTM standards, ASTM 128 A / 128 M, Standard specification for steel castings, austenitic manganese, ASTM International, 1 (2012) 1-4.
  18. Annual book of AWS standards, Standard Welding Procedure Specification, Shielded Metal Arc Welding of Carbon Steel, AWS International, 1 (2005).
  19. Annual book of AWS Standards, Welding Science and Technology, 9th Edition, 1 (2015).
  20. Lee, Y.K., Choi, C.S., Driving Force for  $\gamma \rightarrow \epsilon$  Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of  $\gamma$  in Fe-Mn Binary System, *Metallurgical and Material Transaction A*, 31A (2000) 355-360.
  21. Hong, J.H., Lee, S.H., Kim, J.G., Yoon, J.B., Corrosion behaviour of copper containing low alloy steels in sulphuric acid, *Corrosion Science*, 54 (2012) 174-182.
  22. Hou, R.Q., et al., Localized Corrosion of Binary Mg-Ca Alloy in 0.9 wt% Sodium Chloride Solution, *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 29 (2016) 46-57.
  23. Lim, M. L. C., Kelly, R.G. and Scully, J.R., Overview of Intergranular Corrosion Mechanisms, Phenomenological Observations, and Modeling of AA5083, *Corrosion*, 72 (2016) 198-220.