



تأثیر جوشکاری‌های تعمیراتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوش فولاد 9Cr1Mo

مجید واثقی^{۱*}، ساناز نظرعلیزاده^۲ و محمود سمیع زاده^۱

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

^۲ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

چکیده

یکی از پرکاربردترین فولادهای بکار رفته در بویلرهای نیروگاهی فولاد 9Cr1Mo است. نظر به اینکه یکی از نیازهای کاربردی برای استفاده از این فولاد، تعمیرات دوره‌ای آن است، در این مقاله به تأثیر جوشکاری‌های تعمیراتی فولاد 9Cr1Mo و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و ریزساختار حاصله، پس از چند مرحله جوشکاری و عملیات حرارتی پس‌گرم پرداخته شده است. به منظور بررسی خصوصیات جوشکاری قوسی با الکتروود دستی چند پاسه، پس از اعمال عملیات حرارتی مختلف، مطالعات ریزساختاری بوسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی FESEM، آزمون کشش در دمای اتاق، آزمون ضربه و بررسی‌های سختی سنجی انجام شد. نتایج نشان داد، بین تعداد تعمیرات جوشکاری و افزایش میانگین سختی رابطه مستقیمی وجود داشته و گرادبان سختی در این نمونه‌ها به مراتب بالاتر است، نسبت به نمونه‌ای که تنها یکبار جوشکاری شده است. از سوی دیگر، انجام عملیات پس‌گرم سبب افزایش تعداد رسوبات در فلز جوش و HAZ شده و اندازه دانه‌های استنیت اولیه در فلز جوش و HAZ نیز همگن‌تر می‌شود.

کلمات کلیدی: فولاد 9Cr1Mo؛ جوشکاری ذوبی؛ جوشکاری تعمیراتی؛ میکروسختی؛ ریزساختار.

Effect of Repair Welds on the Microstructure and Mechanical Properties of 9Cr1Mo Welding Joint

M. Vaseghi^{1,*}, S. Nazaralizadeh², M. Sameezadeh¹

¹ Assist. Prof., Mech. Energy Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

² M.Sc., Mech. Energy Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

Abstract

9Cr1Mo steel is widely used in the construction of power plant components. Since performing periodic repairs is one of the most important requirements for industrial use of 9Cr1Mo steel, in the present study, the repair welding of the steel and post-weld heat treatments was carried out and its effect on the mechanical properties and microstructural evolutions after several stages of repair welding was studied. Therefore, a detailed structure-property relationship of weld metal, base metal, and HAZ using optical microscopy, scanning electron microscopy techniques as well as room temperature tensile test, impact test, and microhardness examinations were found. The results showed that there was a direct relationship between the number of welding repairs and the increase in average hardness. Moreover, the hardness gradient in the several welded samples was significantly higher than the one-pass welded sample. On the other hand, post-weld heat treatment operations increased the number of precipitations in the weld metal and HAZ and the size of primary austenite grains in the weld metal and HAZ was more homogeneous.

Keywords: 9Cr1Mo Steel; Fusion Welding; Repair Welding; Microhardness; Microstructure.

۱- مقدمه

امروزه در سراسر دنیا به صورت گسترده‌ای از فولاد کروم مولیبدن در صنعت تولید برق و انرژی استفاده می‌شود. فولاد 9Cr-1Mo به دلیل داشتن هدایت حرارتی زیاد، ضریب انبساط حرارتی کم، مقاومت به خوردگی زیاد، قابلیت جوشکاری خوب، مقاومت بالا به ترک‌های خوردگی تنش‌ی و مقاومت خوب به اکسیداسیون به عنوان جایگزین مناسبی برای فولادهای زنگ نزن در نیروگاه‌ها و در محدوده دمایی °C ۶۵۰-۶۰۰ استفاده می‌شود [۱].

فولادهای 9Cr-1Mo در نیروگاه‌های حرارتی، از دهه ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفتند و همواره کارایی آنها از طریق بهبود ترکیب شیمیایی در حال پیشرفت و بهبود پیاپی بوده است [۲-۴]. حدود دو دهه پیش تیوب‌های مصرفی جهت انتقال بخار سوپرهدیت از جنس فولاد P22 انتخاب می‌شد که در دمای °C ۵۷۰ تنش ۵۰ MPa را تحمل می‌کند، اما امروزه با استفاده از آلیاژهای سری P91، می‌توان در همان دما ضخامت را به میزان ۴۰ درصد کاهش داد [۵].

بعلاوه، مقاومت خزشی فولاد 9Cr1Mo با افزودن مقادیر کم از عناصر کاربیدزا و نیتريدزا مانند وانادیوم و نیوبیوم به همراه کنترل میزان نیتروژن، افزایش یافته است و این فولاد به صورت بهبود یافته و به نام T91 (Grade 91 (X10CrMoVNb 9-1) برای پایپ، برای تیوب و ASTM A387 برای صفحه شناسایی می‌شود [۱]. وجود نیوبیوم و وانادیوم در این فولاد، سبب ایجاد ذرات ریز کاربیدی و کاربونیترییدی وانادیوم و نیوبیوم به صورت پراکنده در ساختار شده و منجر به حفظ و پایداری ساختار و استحکام بالا در زمان‌های طولانی و دماهای بالا می‌شود [۵]. به دلیل استحکام خزشی زیاد این فولاد در مقایسه با سایر فولادهای فرتی، می‌توان آن را در مقاطع نازک‌تر استفاده کرد [۶].

فولاد P91 قابلیت جوشکاری با بسیاری از روش‌های قوسی از جمله، جوشکاری قوسی با الکتروود دستی^۱، جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستن به همراه گاز محافظ^۲ و

جوشکاری زیرپودری^۳ را دارد [۷]. هر فرآیندی که روی این فولاد انجام شود و باعث تغییر ساختار آن شود، باید با عملیات حرارتی اصلاح گردد. یک قطعه جوشکاری شده فولاد P91 شامل: فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت^۴ است که خود دارای سه منطقه متأثر از حرارت درشت دانه^۵، متأثر از حرارت ریز دانه^۶ و متأثر از حرارت بحرانی^۷ است [۸].

با توجه به اینکه فرآیند جوشکاری باعث تغییر در ساختار این فولاد می‌شود، نیاز به عملیات حرارتی بعد از جوشکاری در آلیاژ P91 برای هر قطر و ضخامتی ضروری است. فرآیند پیش گرم، کنترل دمایی بین پاس‌های جوشکاری و عملیات حرارتی پس از جوشکاری، جهت بدست آوردن چقرمگی و مقاومت به خزش مطلوب، مورد نیاز است.

کنترل دماهای پیش گرم و بین پاس‌ها و حتی پس گرم برای جلوگیری از باقی ماندن هیدروژن و مشکل ترک بسیار ضروری است. در این خصوص می‌توان از روش‌های مختلف نظیر، شعله، گرم کردن در کوره، مقاومت الکتریکی و روش القای الکتریکی استفاده کرد. با توجه به اینکه نظارت دمایی و کنترل گرادیان دما در این آلیاژ بسیار اهمیت دارد، روش‌هایی نظیر، گرم کردن موضعی با شعله توصیه نمی‌شود [۹].

فرآیند عملیات حرارتی پس‌گرم^۸ یکی از مهمترین فاکتورها در تولید موفق قطعات جوشکاری شده است که باید با اطمینان از اینکه تمام نقاط جوش به دمای مناسب رسیده‌اند، انجام گردد. در حقیقت این فرآیند یک عملیات حرارتی تمپر مناسب، روی ساختار مارتنزیتی برای دستیابی به چقرمگی مورد نیاز است [۹].

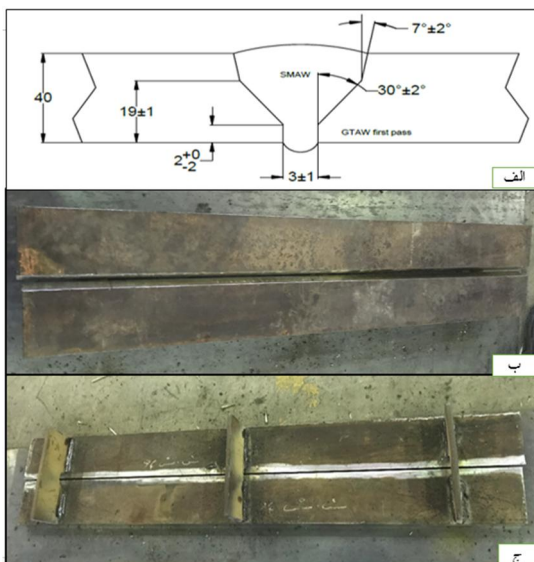
آلبرت و همکاران [۱۰] گزارش دادند که در فولاد 9Cr1Mo هر دو ناحیه فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت مستعد ترک‌های هیدروژنی^۹ هستند. ماگودیسواران و همکاران [۱۱]، با آزمایش روی فولاد استحکام بالا و کوئنچ-تمپر، گزارش کردند که مواد مصرفی جوشکاری در فولادهای

^۳ SAW^۴ HAZ^۵ CGHAZ^۶ FGHAZ^۷ ICHAZ^۸ PWHT^۹ HAC^۱ SMAW^۲ GTAW

پس از تعمیرات روی آنها صورت گرفت. برای این منظور از صفحه A387-91 با ضخامت ۴۰ mm دو قطعه به طول ۱۵۰۰ mm و عرض ۳۰۰ mm برش داده شد. صفحه‌ها مطابق شکل ۱ الف و ب به صورت لب به لب و به فاصله 3 ± 1 mm و با درز جوش جناقی با زاویه 75° کنار یکدیگر قرار گرفتند. جهت حفظ فاصله و جلوگیری از تاب برداشتن صفحه‌ها حین جوشکاری، مطابق شکل ۱ ج در پشت کار، پشت‌بند گذاشته شد.

جدول ۱- مراحل ساخت نمونه‌ها

کد نمونه	وضعیت الکتروود/ وضعیت عملیات پس‌گرم
WNR	جوشکاری- عملیات پس‌گرم
WR1	جوشکاری اول- برداشت جوشکاری اول- جوشکاری دوم- عملیات پس‌گرم
WPR1	جوشکاری اول- عملیات پس‌گرم- برداشت جوشکاری اول- جوشکاری دوم- عملیات پس‌گرم
WR2	جوشکاری اول- برداشت جوشکاری اول- جوشکاری دوم- برداشت جوشکاری دوم- جوشکاری سوم- عملیات پس‌گرم



شکل ۱- آماده سازی صفحات P91 برای جوشکاری: الف) نحوه پخ‌زنی و کنار هم قرار گرفتن صفحه‌ها برای جوشکاری (ابعاد به mm)، ب) قطعه آماده شده پس از پخ‌زنی و ج): پشت قطعه و پشت‌بندها

کوئنچ-تمپر نقش بسیار مهمی در بروز ترک‌های هیدروژنی دارد.

یو [۱۲] با بررسی سه فولاد متفاوت، BA-160, HY-100, HSLA-100 به این نتیجه رسید که منطقه درشت دانه متأثر از حرارت نسبت به کل منطقه متأثر از حرارت، بیشتر مستعد ترک است؛ همچنین پیش‌گرم کردن و گرمای ورودی بالا، باعث کاهش تمایل به ترک در فلز می‌شود.

یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در صنایع نیروگاهی، جوشکاری‌های تعمیراتی در سازه‌های فلزی علی‌الخصوص بویلرهاست که عموماً در آن از فولادهای آلیاژی پر کروم استفاده می‌شود. در بویلرهای نیروگاهی مکانیزم‌های تخریب فراوانی نظیر، خزش، خوردگی، خستگی، اکسیداسیون و غیره سبب زوال اجزاء آن می‌شود و در نتیجه تمام یا بخشی از آن اجزاء بایستی تعویض گردد. در این حالت انجام جوشکاری‌های تعمیراتی اجتناب‌ناپذیر است؛ لذا با توجه به اینکه انجام هر بار جوشکاری و عملیات حرارتی متعاقب آن بر ریزساختار قطعات فلزی تأثیرگذار است، در این پژوهش سعی شده است، با طراحی و پیاده‌سازی صنعتی ۴ سیکل جوشکاری تعمیراتی و عملیات حرارتی پس‌گرم متعاقب آن، تحولات ریزساختاری و تغییرات خواص مکانیکی از جمله خواص کششی، گرادیان سختی در نواحی فلز جوش، فلز پایه و HAZ و همچنین چقرمگی ضربه هریک از نواحی مذکور، بررسی شود. در پایان پس از جمع‌بندی نتایج، آثار جوشکاری تعمیراتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد 9Cr1Mo ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

قطعات پس از جوشکاری ممکن است، دارای عیوب مختلفی مانند، حفره، آخال، عدم نفوذ، عدم ذوب، ترک و... باشند؛ لذا نیاز به تعمیرات از طریق جوشکاری مجدد امری بدیهی و اجتناب‌ناپذیر است. به منظور بررسی اثر جوشکاری‌های متوالی روی خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد P91، قطعاتی بوسیله جوشکاری تهیه شد و به منظور شبیه‌سازی با شرایط واقعی هنگام تعمیرات، منطقه جوش از قطعه برداشته شد. این عمل تا دو مرتبه برای قطعه به با کدهای WNR, WR1, WPR1 و WR2 مطابق جدول ۱ تکرار شد و آزمون‌های کیفی و کمی جهت بررسی حفظ خواص قطعات



شکل ۲- قطعه آماده شده برای جوشکاری پس از قرار دادن المنت‌ها و عایق‌بندی

جدول ۲- ترکیب شیمیایی الکترودهای مصرفی

الکتروده	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی wt.%)							
	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	V
ER90S-B9	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۵۵	۰/۰۰۲	۸/۶۸	۰/۴۹	۰/۸۸	۰/۱۹
E9015-B9	۰/۱۱	۰/۳۱	۰/۶۲	۰/۰۰۶	۸/۴	۰/۸	۰/۹۲	۰/۲۶

تامین حرارت لازم جهت عملیات حرارتی‌های پیش‌گرم و پس‌گرم و حفظ حرارت بین پاسی توسط المنت‌های سرامیکی انجام شد. پس از پوشاندن قطعه با المنت، روی آن با عایق سرامیکی با چگالی 128 Kg/m^3 و ضخامت 50 mm پوشانده شد. در شکل ۲ قطعه آماده شده برای جوشکاری نشان داده شده است. پس از آماده سازی قطعات، جهت انجام پیش‌گرم، دمای صفحات طبق دستورالعمل به کمک المنت حرارتی به 205°C رسانده شد.

برای اولین پاس جوشکاری از روش GTAW با الکتروده B9 به قطر $2/4 \text{ mm}$ همراه با گاز محافظ آرگون استفاده شد.

در پاس‌های دوم و سوم، جوشکاری به روش SMAW و با الکتروده E9015-B9 با قطر $3/2 \text{ mm}$ و از پاس چهارم به بعد از همان الکتروده با قطر 4 mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی الکترودها در جدول ۲ آورده شده است.

دمای قطعه در حین جوشکاری کنترل شد، تا از 300°C بالاتر نرود. پس از هر پاس جوشکاری، برس زنی و سنگ زنی برای تمیز کردن سطح انجام شد. میزان شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری براساس دستورالعمل و مطابق جدول ۳ انتخاب شد. پس از اتمام جوشکاری در هر مرحله آزمون رادیوگرافی روی جوش انجام شد که تا حد امکان از مناطق عاری از عیب نمونه گیری صورت گیرد. پس

جدول ۳- شرایط جوشکاری قطعات WR2 و WPR1، WR1، WNR

شماره پاس	اول	دوم به بعد
نوع جوشکاری	جوشکاری قوسی با الکتروده تنگستن (GTAW)	جوشکاری قوسی با الکتروده دستی (SMAW)
الکتروده	ER90S-B9	E9015-B9
قطر (mm)	۲/۴	۴ و ۳/۲
نوع	DCEN	DCEP
شدت جریان	۱۰۰ - ۱۵۰	۱۱۰ - ۱۷۰
ولتاژ (V)	۱۶ - ۱۸	۲۰ - ۲۱
سرعت جوشکاری (cm/min)	۵ - ۹	۱۰ - ۱۵

جدول ۴- ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش و مقایسه با ترکیب شیمیایی استاندارد

جنس	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی wt.%)							
	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	V
Base Metal	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۴۱	۰/۰۰۰۹	۹/۳	۰/۹۱	۰/۲۵	۰/۱۸
WNR	۰/۱۰	۰/۲۸	۰/۷۳	۰/۰۰۴	۸/۹۵	۱/۰۰	۰/۷۰	۰/۲۵
WR1	۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۷۱	۰/۰۰۳	۸/۸	۰/۹۴	۰/۶۸	۰/۲۴
WPR1	۰/۰۹	۰/۲۴	۰/۷۱	۰/۰۰۳	۸/۹	۰/۹۴	۰/۷۰	۰/۲۳
WR2	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۶۱	۰/۰۰۴	۸/۶	۰/۹۴	۰/۶۹	۰/۲۱
ASTM A387	۰/۱۵	۰/۵۶	۰/۶۶	≤۰/۰۱۲	۹/۶۰	۱/۱۰	۰/۴۳	۰/۲۷
	۰/۰۶	۰/۱۸	۰/۲۵		۷/۹۰	۰/۸۰		۰/۱۶

فلز پایه و جوش در تمامی قطعات از جنس فولاد P91 است. ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A387-91 نیز، برای مقایسه در جدول مذکور آورده شده است.

به منظور بررسی ریزساختار قطعات، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی هر یک از قطعات در نواحی فلز پایه، فلز جوش و سه منطقه از ناحیه متأثر از جوش (CGHAZ، FGHAZ و ICHAZ)، مطابق استاندارد ASTM E3-11 آماده‌سازی و سپس مطابق با استاندارد ASTM E407-07 و با محلول نایتال ۲ درصد اچ شدند. از تمامی مناطق مذکور مطابق با استاندارد ASTM E883-11 تصاویر متالوگرافی تهیه شد و اندازه دانه‌های استنیت اولیه نیز مطابق با استاندارد ASTM E112-13 مطالعه شد. به منظور بررسی دقیق‌تر ریزساختار تمام نمونه‌ها توسط FESEM مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

به منظور سختی سنجی، مقطع عرضی هر یک از چهار قطعه آماده سازی شد و برای مشخص شدن نواحی مختلف اتصال با محلول ماربل ماکرو-اچ شدند. سختی سنجی مطابق با استاندارد ASTM E384 توسط دستگاه میکروسختی سنج ویکرز مدل DM2D انجام شد. سختی سنجی از مرکز جوش شروع شد و به سمت فلز پایه به فاصله ۱ میلی‌متر از هم تکرار گردید؛ همچنین بدلیل ضخیم بودن صفحات جوش

از هر مرحله جوشکاری قطعه بلافاصله و به مدت ۲ ساعت در دمای °C ۳۰۰ به کمک المنت حرارتی پس‌گرم شد. به منظور بررسی تاثیر جوشکاری‌های متوالی بر این فولاد مراحلی به شرح ادامه، طراحی و انجام شد.

پس از یک مرحله جوشکاری کامل، نمونه‌ایی به طول mm ۴۰۰ از قطعه برشکاری شد و سپس تحت عملیات حرارتی پس‌گرم در دمای °C ۷۵۰ به مدت ۲ ساعت قرار گرفت (نمونه WNR). پس از آن نمونه‌ایی دیگر به طول mm ۴۰۰ از قطعه جدا شد و ناحیه جوش آن به جز پاس‌های ریشه همانند شکل ۳ تخلیه شد و قطعه مجدداً همانند مراحل ذکر شده جوشکاری و پس از آن در دمای °C ۷۵۰ به مدت ۲ ساعت عملیات حرارتی پس‌گرم شد (نمونه WR1).

حدود mm ۴۰۰ دیگر از قطعه ابتدا تحت عملیات حرارتی پس‌گرم قرار گرفته و سپس مجدداً ناحیه جوش تخلیه شد و مجدداً با شرایط گفته شده جوشکاری و پس‌گرم شد (نمونه WPR1). باقیمانده قطعه بعد از دو مرتبه تخلیه جوش و تعمیر، تحت عملیات حرارتی پس‌گرم قرار گرفت (نمونه WR2).

آنالیز ترکیب شیمیایی از فلز پایه و فلز جوش قطعات WNR، WR1، WPR1 و WR2 بوسیله دستگاه اسپکترومتری نشر نوری مدل Foundry Master-Pro انجام شد.

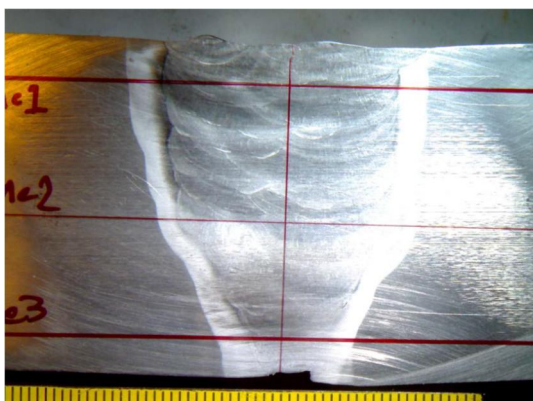
نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش قطعات WNR، WR1، WPR1 و WR2 در جدول ۴ آورده شده است. مقایسه تطبیقی نتایج آنالیز انجام شده با ترکیب شیمیایی استاندارد آلیاژهای فولادی نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی



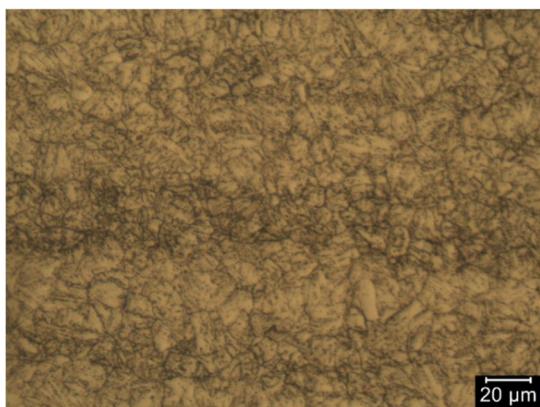
شکل ۳- تصویری از قطعه بعد از خارج کردن جوش

شکل ۷ ساختار مناطق مختلف قطعه جوشکاری شده بعد از جوشکاری و بدون عملیات حرارتی پس‌گرم را نمایش می‌دهد. همانند آنچه در شکل ۷-الف دیده می‌شود، فلز جوش دارای ساختار مارتنزیتی تمپر نشده است. در این شکل لایه‌های ستونی به وضوح دیده می‌شوند. پاندی و همکاران [۷] و ورا و بادکا [۱۴] نیز، ساختاری مشابه را قبلاً ارائه داده‌اند.

مناطق اطراف فلز جوش بسته به اینکه هنگام جوشکاری تا چه دمایی حرارت دیده‌اند، مناطق مختلفی از HAZ را بوجود می‌آورند. منطقه CGHAZ بیشترین دما را (بالا تر از A_{c3} که تقریباً 925°C است) تحمل می‌کند. در این دمای بالا رسوباتی که از رشد دانه‌های استنیتی جلوگیری می‌کنند، حل می‌شوند و دانه‌های استنیتی درشتی ایجاد می‌شود که در حین سرد شدن به مارتنزیت تبدیل می‌شوند (شکل ۷-ب).



شکل ۴- نمونه تهیه شده جهت سختی سنجی



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فلز پایه

داده شده سختی سنجی در سطح، مرکز و ریشه نمونه‌ها در سه امتداد مطابق شکل ۴ صورت گرفت.

از هر یک از قطعات WR1، WNR، WPR1 و WR2 سه نمونه آزمون کشش تخت مطابق استاندارد ASTM E8، به صورت عرضی به نحوی تهیه شد که جوش در قسمت میانی نمونه باشد. آزمون کشش بوسیله دستگاه کشش مدل SGM-50 در دمای اتاق و با نرخ 1 mm/min انجام شد.

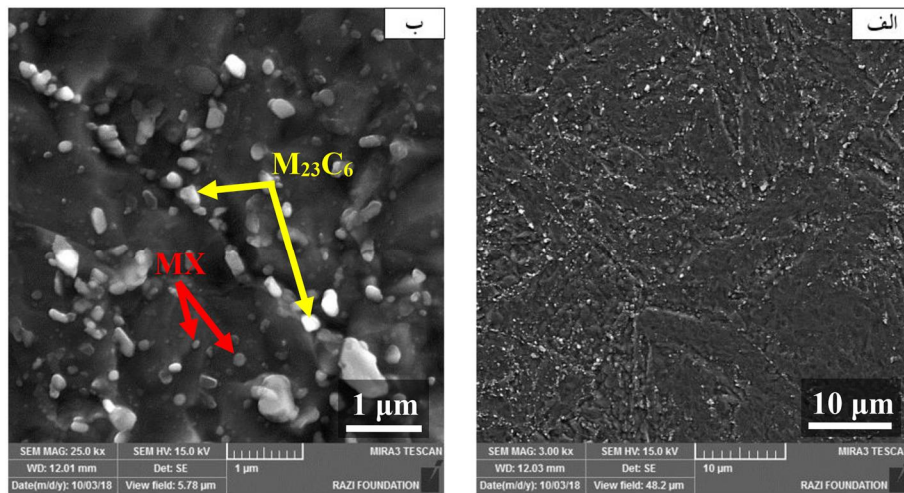
از هر یک از چهار حالت، ۹ نمونه (۳ نمونه از فلز جوش، ۳ نمونه از منطقه متأثر از حرارت و ۳ نمونه از فلز پایه)، برای آزمون ضربه شاری طبق استاندارد ASTM E23 و با ابعاد $10 \times 10 \times 55\text{ mm}$ تهیه شد. برای تعیین محل دقیق شیارها، نمونه‌ها قبل از شیارزنی با محلول ماربل، ماکرو-اچ شدند. آزمون ضربه شاری در دمای محیط (20°C) و با دستگاه مدل SIT-300AE انجام شد. پس از انجام آزمون ضربه به منظور بررسی نوع شکست، سطوح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی مطالعه شدند. در ادامه نتایج بررسی‌های صورت گرفته ارائه گردیده و مورد بحث قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

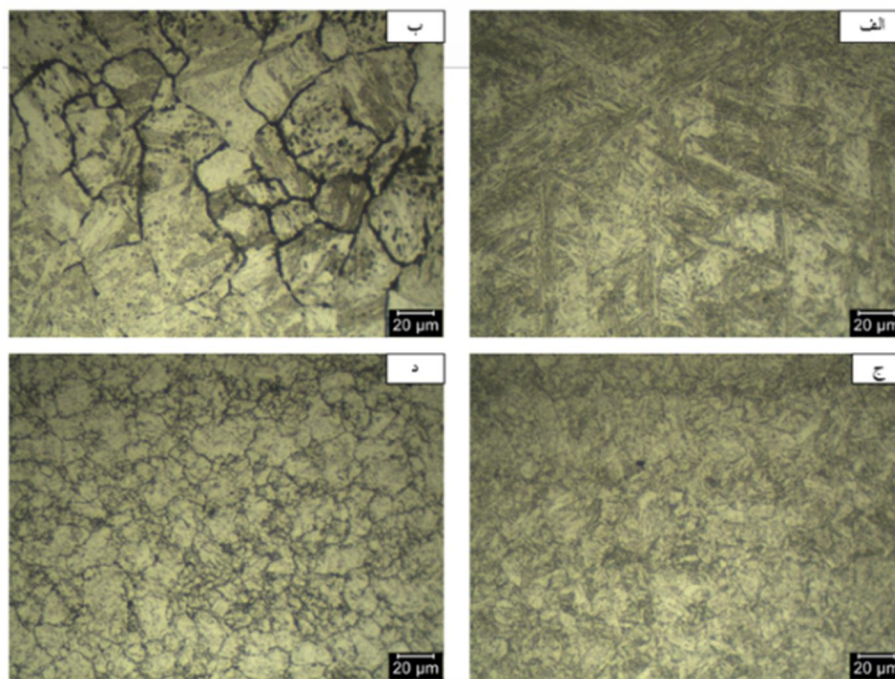
۳-۱- بررسی ریزساختار

جهت بررسی ریزساختار و تغییرات آن در اثر تعمیرات متوالی جوش، مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی انجام شد. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مرز دانه‌های استنیت اولیه و بسته‌های مارتنزیت لایه‌ای را ملاحظه کرد. شکل ۶ ریزساختار FESEM فولاد P91 (فلز پایه) استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ الف مشخص است، ریزساختار شامل، لایه‌های مارتنزیت تمپر شده همراه با رسوبات درشت و ریز در طول مرز دانه و داخل لایه‌ها است.

رسوبات فولاد P91 شامل $M_{23}C_6$ (به طوریکه $M=\text{Cr, Fe}$) و MX (به طوریکه $M=\text{V, Nb}$ و $X=\text{C, N}$) هستند. رسوبات درشت $M_{23}C_6$ روی مرزها جوانه می‌زنند، در حالیکه رسوبات ریز MX داخل زمینه و مرزها جوانه می‌زنند [۱۳]. در شکل ۶ ب نحوه توزیع و اندازه رسوبات (سفید رنگ) در مرز دانه و زمینه فلز پایه مشخص شده است.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی فلز پایه: الف) در بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر و ب) نحوه توزیع رسوبات در مرز دانه‌های استنیت اولیه و داخل زمینه در بزرگنمایی ۲۵۰۰۰ برابر



شکل ۷- ریزساختار قطعه WNR قبل از عملیات پس‌گرم: الف) در ناحیه جوش، ب) CGHAZ، ج) FGHAZ و د) ICHAZ

در این ناحیه رسوبات نمی‌توانند به طور کامل حل شوند، بنابراین در ساختار، مارتنزیت تمپر شده همراه با رسوبات ریز و درشت وجود دارد [۱۵]. در لوله‌های جوشکاری شده P91، ترک‌های متداول نوع IV از ناحیه ضعیف FGHAZ شروع می‌شود. در ناحیه‌ای که بیشترین دما در محدوده دمایی بین

مرز دانه‌های استنیت اولیه در این شکل به وضوح قابل ملاحظه است. هر چه فاصله از فلز جوش بیشتر شود، از حرارتی که فلز پایه متحمل می‌شود، کاسته شده و در نتیجه استنیت ریز دانه تری (FGHAZ) تشکیل می‌شود (شکل ۷-ج).

داخل زمینه است. بعد از عملیات پس‌گرم، در فلز جوش درصد بالاتری از رسوبات وجود دارد.

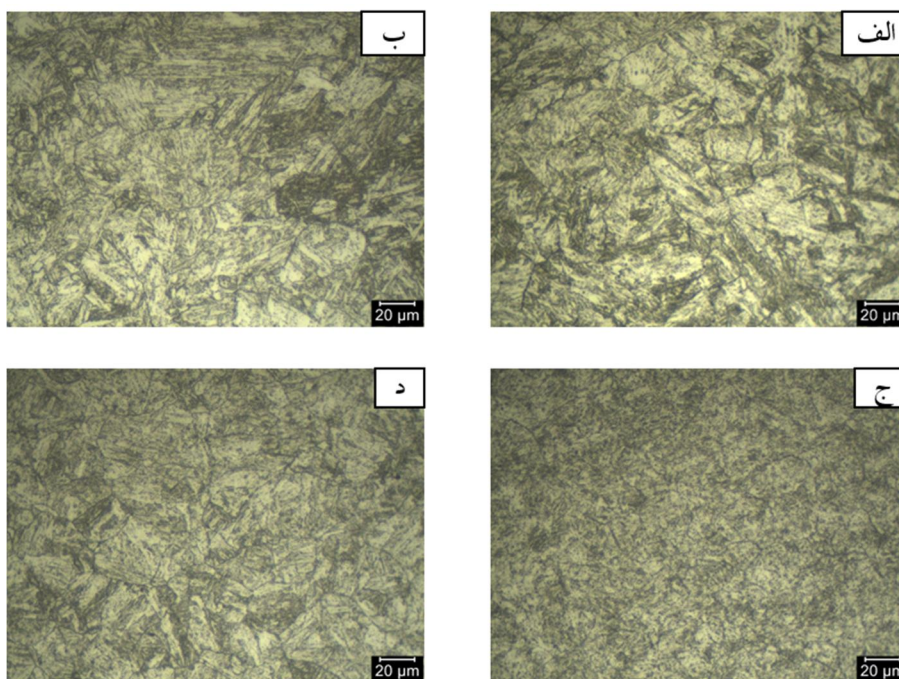
در شکل ۹ تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فلز جوش را در نمونه‌های WNR، WR1، WPR1 و WR2 می‌توان مشاهده کرد. با توجه به اینکه تمام قطعات پس از جوشکاری، عملیات پس‌گرم شدند، ریزساختار تمام قطعات مشابه و شامل مارتنزیت تمپر شده به همراه رسوبات پراکنده است.

شکل، اندازه و نحوه توزیع رسوبات روی مرز دانه استنیت اولیه و داخل زمینه مارتنزیتی فلز جوش در شکل ۱۰-الف قابل مشاهده است. بیشتر رسوبات درشت روی مرز دانه‌های استنیت اولیه وجود دارند که با آنچه در منابع ذکر شده است [۱۳]، همخوانی دارد. طیف EDS برای یکی از ذرات (ذره A) داخل ساختار در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است. با توجه به درصد وزنی عناصر، این ذره از جنس کاربیدهای کروم و آهن است.

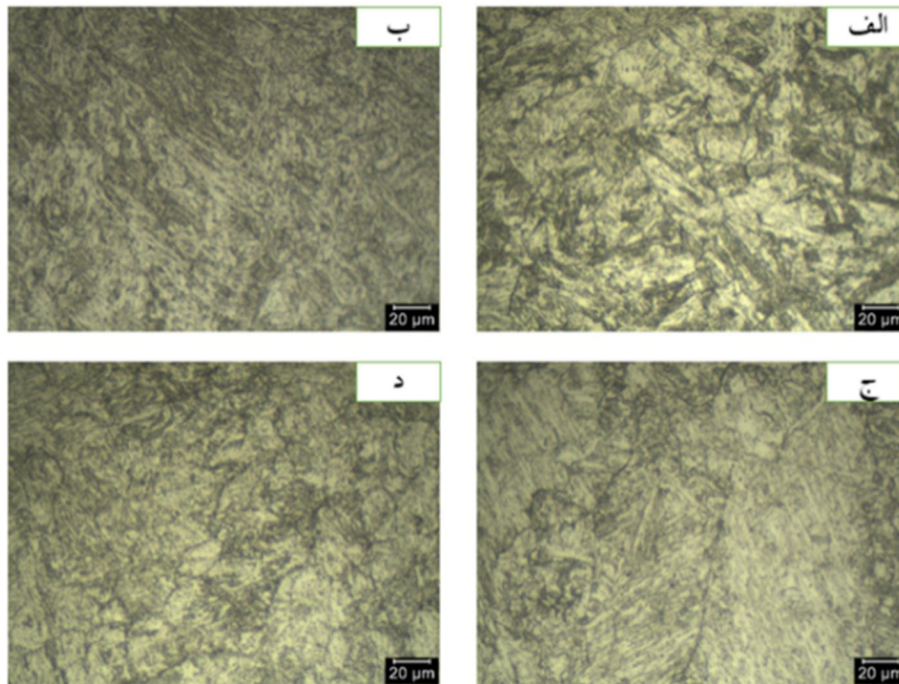
تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار منطقه متاثر از جوش قطعات WNR، WR1، WPR1 و WR2 در شکل ۱۱ آورده شده است. در هر یک از این شکل‌ها منطقه HAZ به

به دلیل اینکه تنها قسمتی از ساختار به استنیت تبدیل شده است، ساختاری مخلوط دارد و به این منطقه ICHAZ اطلاق می‌شود. در این ناحیه رسوبات به صورت جزئی حل می‌شوند و رسوبات باقی مانده درشت می‌شوند (شکل ۷-د)؛ همچنین بدلیل قرار گرفتن در معرض حرارت هنگام جوشکاری، مارتنزیت خود به خود تمپر می‌شود [۱۵ و ۱۶]. ریزساختار این ناحیه شامل، ترکیبی از لایه‌های مارتنزیت‌های ستونی جدید و مارتنزیت تمپر شده هم محور است. بر اساس گزارش‌های علمی، در ICHAZ مرزهای استنیت اولیه و مرزهای فرعی دارای رسوبات $M_{23}C_6$ هستند، در حالیکه رسوبات ظریف کربونیتريد وانادیوم و نیوبیوم هم در مرز دانه و هم داخل زمینه قرار دارند. ICHAZ نیز همانند FGHAZ مستعد ترک نوع IV است [۱۵ و ۱۶].

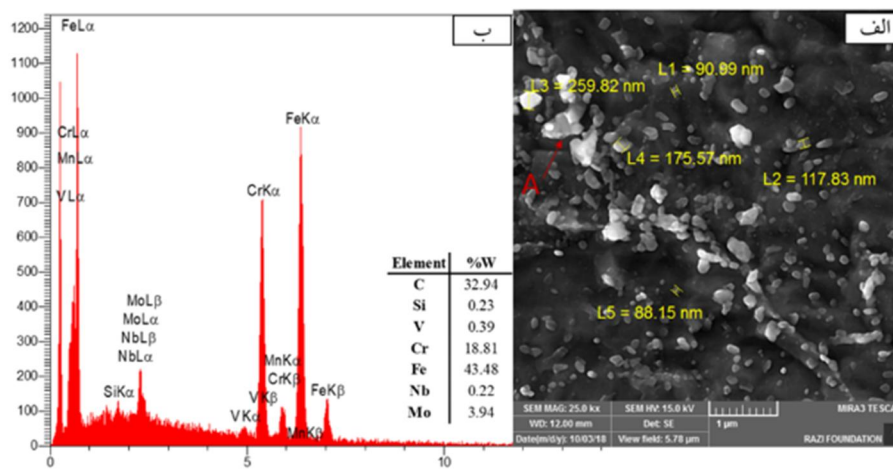
برای غلبه بر گرادیان سختی و اختلاف‌هایی که در ریزساختار قطعات جوشکاری شده P91 وجود دارد، عملیات پس‌گرم الزامی است. شکل ۸ ریزساختار قطعه WNR را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه این قطعه پس از جوشکاری عملیات پس‌گرم شده است، ریزساختار فلز جوش به صورت لایه‌های مارتنزیت ستونی تمپر شده، رسوبات روی مرزها و



شکل ۸- ریزساختار نمونه جوشکاری WNR؛ الف) در ناحیه جوش، ب) CGHAZ، ج) FGHAZ و د) ICHAZ



شکل ۹- ریزساختار فلز جوش؛ الف) نمونه WNR، ب) نمونه WR1، ج) نمونه WPR1 و د) نمونه WR2



شکل ۱۰- الف) اندازه و نحوه توزیع رسوبات در فلز جوش نمونه WNR در بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر و ب) EDS از ذره A در شکل الف

حین جوشکاری، بزرگ می‌شود. عدد اندازه دانه بر اساس استاندارد ASTM در ناحیه نزدیک به جوش در شکل ۱۱- الف در بزرگترین دانه، ۶/۵ و در کوچکترین آن، ۹ است. اندازه دانه‌های استنیت اولیه CGHAZ در نمونه WPR1 به نسبت نمونه‌های دیگر درشت تر است، به این دلیل که

سه ناحیه CGHAZ (نزدیک منطقه جوش)، FGHAZ (قسمت میانی شکل) و ICHAZ (ناحیه کنار فلز پایه) تقسیم شده است. با توجه به اینکه تمام این قطعات عملیات پس‌گرم شده‌اند، انتظار می‌رود که اندازه دانه‌های ساختار یکنواخت تر از حالت قبل از عملیات پس‌گرم باشد. اندازه دانه‌ها در ناحیه نزدیک به فلز جوش به دلیل انحلال رسوبات در دمای بالا

روی نمونه‌ها انجام شد. میزان متوسط استحکام تسلیم (Ys)، استحکام نهایی (UTS) و درصد ازدیاد طول نسبی (%El) نمونه‌ها و همچنین مکان شکست (FL) در جدول ۵ آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مکان شکست در تمام نمونه‌ها فلز پایه (B.M.) است؛ بنابراین استحکام جوش در همه نمونه‌ها از استحکام فلز پایه بیشتر است و اعداد استحکام تسلیم و استحکام نهایی بدست آمده با توجه به اینکه همه نمونه‌ها از منطقه فلز پایه شکسته‌اند، مربوط به فلز پایه است.

جدول ۵- نتایج آزمون کشش

کد نمونه	FL	Ys (MPa)	UTS (MPa)	%El
WNR	فلز پایه	۳۹۴	۵۷۷	۲۷/۳
WR1	فلز پایه	۵۰۹	۶۶۸	۲۱/۲
WPR1	فلز پایه	۵۳۲	۶۹۳	۲۱/۵
WR2	فلز پایه	۵۶۰	۶۸۷	۲۳/۱

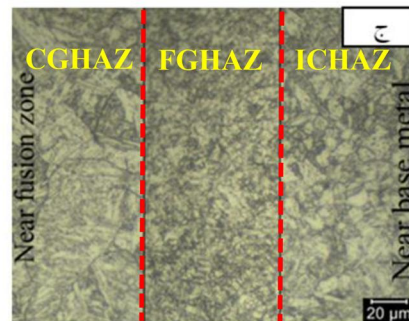
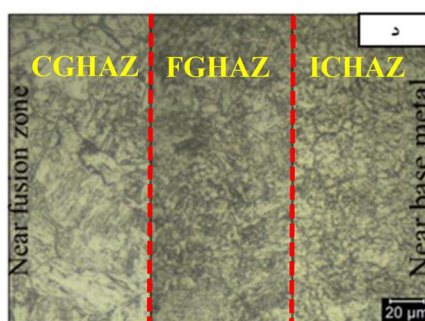
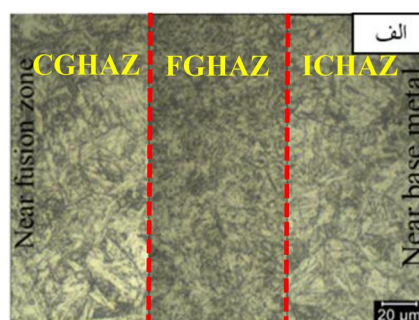
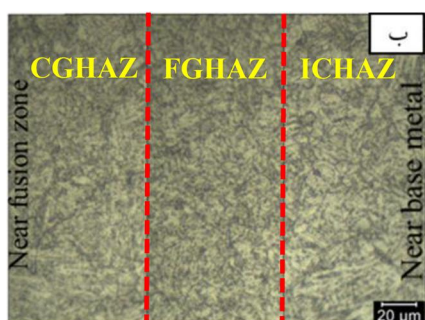
نمونه WPR1 قبل از جوشکاری دوم عملیات پس‌گرم شده است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل ۱۲ مربوط به منطقه CGHAZ در نمونه‌ها است. رسوباتی که در حین جوشکاری در زمینه حل شده‌اند، با پس‌گرم دوباره ظاهر می‌شوند؛ همچنین عملیات پس‌گرم باعث می‌شود، رسوباتی که حین جوشکاری حل نشده‌اند بزرگتر شوند و رسوبات جدید در روی مرز و داخل زمینه بوجود آیند [۷]. جوشکاری مجدد باعث شده است که درصد رسوبات روی مرز دانه‌ها بیشتر شود و از رسوبات زمینه کاسته شود، این موضوع خصوصا در شکل ۱۲-د (که سه بار جوشکاری شده است) واضح تر است.

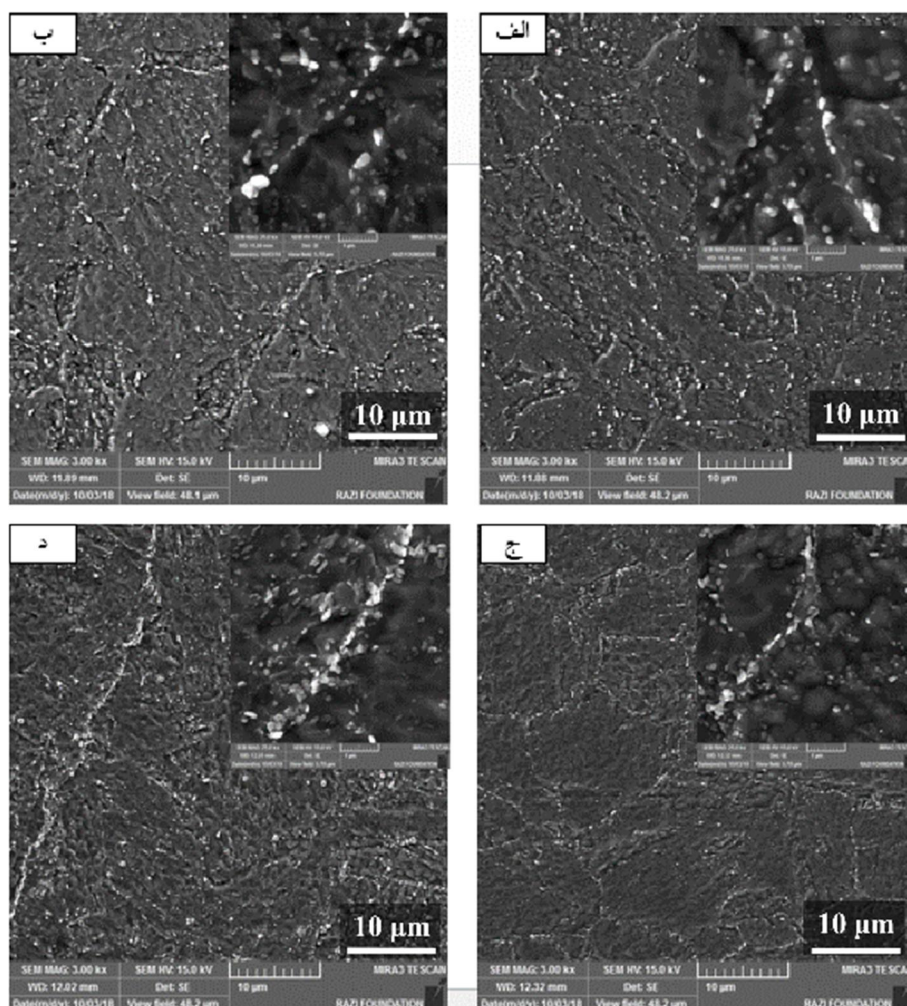
میزان رسوبات و همگنی اندازه آن‌ها، در نمونه‌ای که قبل از جوشکاری دوم، پس‌گرم شده بود (نمونه WPR1) بیشتر از نمونه WR1 است.

۳-۲- آزمون کشش

از هر یک از قطعات WNR، WR1، WPR1 و WR2، سه نمونه آزمون کشش تخت در ناحیه جوش تهیه شد و آزمون کشش



شکل ۱۱- مقایسه ریزساختار منطقه متاثر از جوش؛ الف) نمونه WNR، ب) نمونه WR1، ج) نمونه WPR1 و د) نمونه WR2



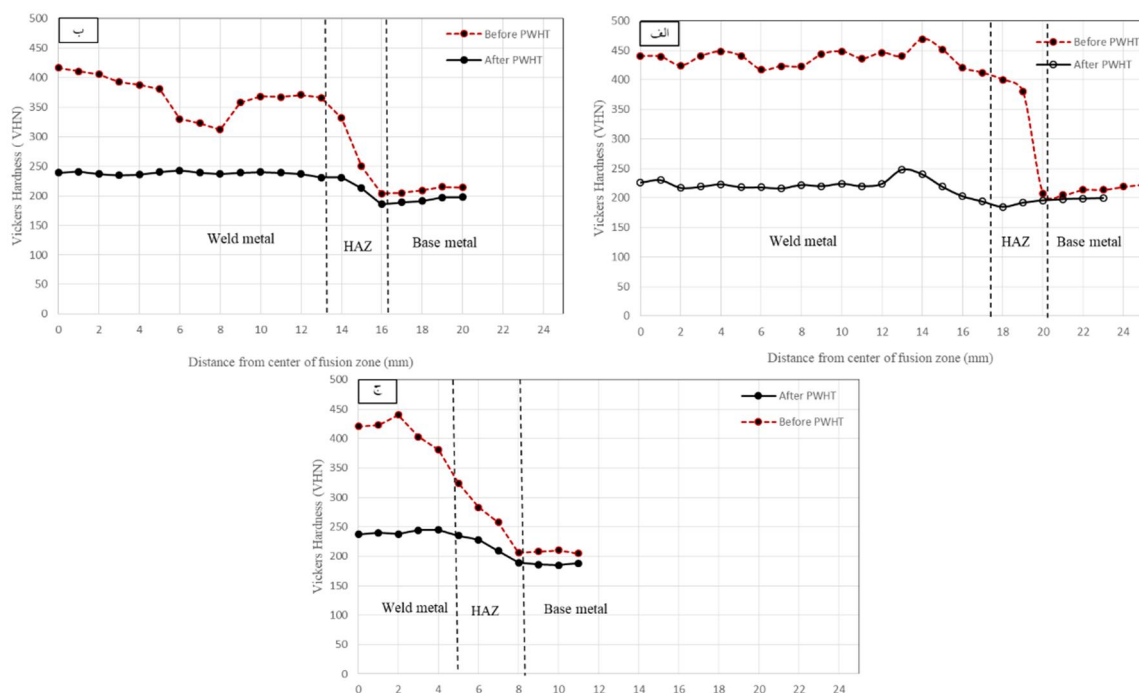
شکل ۱۲- تصویر FESEM منطقه متأثر از جوش (در نزدیکترین ناحیه به جوش):

الف) نمونه WNR، ب) WR1، ج) WPR1 و د) WR2

۳-۳- میکروسختی سنجی

به منظور بررسی تاثیر عملیات حرارتی پس گرم روی سختی قطعات، از نمونه WNR قبل و بعد از عملیات حرارتی میکروسختی سنجی انجام شد. با توجه به ضخیم بودن نمونه و جهت بررسی سختی در تمام لایه‌های سطحی، میانی و زیرین نمونه، از تمامی این لایه‌ها از مرکز جوش و با فاصله ۱ میلی‌متر سختی سنجی انجام شد. نتایج میکروسختی قبل و بعد از عملیات حرارتی در نمودارهای شکل ۱۳ آورده شده است. ریزساختار مناطق مختلف، حل شدن رسوبات، اندازه دانه‌های استنیت اولیه، وجود رسوبات روی مرزهای

دانه استنیت اولیه و داخل زمینه، فاکتورهای اساسی برای کنترل سختی در یک قطعه جوشکاری هستند [۱۷]. بعد از جوشکاری حل شدن کامل رسوبات، میزان کربن و نیتروژن در محلول جامد را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود، مارتنزیت لایه‌ای سختی هم در فلز جوش و هم در CGHAZ ایجاد گردد. هر چه از ناحیه جوش فاصله گرفته شود، تغییر قابل توجهی در سختی به دلیل کاهش میزان کربن و نیتروژن محلول جامد بوجود می‌آید. کاهش کربن به دلیل حل شدن ناقص رسوبات در منطقه FGHAZ و ICHAZ است. ICHAZ به عنوان نرم‌ترین منطقه شناسایی شده است [۱۷ و ۱۸]. در این شکل مناطق جوش، HAZ و فلز پایه با



شکل ۱۳- تاثیر عملیات پس گرم بر پروفایل سختی؛ الف) در نزدیک سطح بالایی، ب) در میانه ضخامت و ج) در نزدیک سطح پایینی نمونه

است (میانگین سختی فلز جوش در قطعات WR1، WNR و WR2 به ترتیب ۲۳۸، ۲۵۴ و ۲۵۲ ویکرز است)؛ همچنین در ناحیه متأثر از جوش، نمونه WR2 سختی بالاتری را نسبت به بقیه نشان می‌دهد (میانگین سختی HAZ در WR2، برابر با ۲۳۵ ویکرز و در WRN، ۲۱۰ ویکرز است). اختلاف در سختی به این دلیل است که در جوشکاری دوم و سوم، ناحیه کناری فلز جوش به جای اینکه فلز پایه باشد، منطقه متأثر از جوش در جوشکاری اول است و نسبت به فلز پایه سختی بالاتری دارد.

در شکل ۱۵ تاثیر عملیات حرارتی پس گرم قبل از جوشکاری دوم روی سختی در نمونه‌های قطعات WR1 و WPR1 آورده شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود، در صورتی که قبل از جوشکاری دوم عملیات حرارتی پس گرم صورت گیرد (همانند آنچه در قطعه WPR1 انجام شد)، سختی در نواحی جوش و منطقه متأثر از جوش کمتر از حالتی است که قطعه تحت تاثیر هیچگونه عملیات حرارتی قبل از تعمیرات نباشد و گرادیان سختی بسیار کم شده است. در حقیقت، در این حالت بعد از پس گرم سختی

توجه به ماکروچ نمونه‌ها از هم تفکیک شده‌اند. سختی پایین در ICHAZ و FGHAZ این مناطق را مستعد ترک‌های نوع IV می‌کند. این گرادیان حرارتی بعد از جوشکاری، سبب می‌شود که ساختار قطعات جوشکاری شده فولاد P91 ناهمگن باشند.

برای غلبه بر این ناهمگنی سختی و ساختاری، عملیات پس گرم انجام شد. بعد از پس گرم، سختی در ناحیه فلز جوش و CGHAZ به شدت افت کرد (حدود ۲۰۰ ویکرز). سختی در FGHAZ و ICHAZ نیز بعد از پس گرم کاهش جزئی داشت و به طور کلی عملیات پس گرم گرادیان سختی را کم کرده است، ولی به طور کامل آن را نتوانسته از بین ببرد؛ همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۴ الف تا ۱۴ ج مشاهده می‌شود که گرادیان سختی در لایه‌های عمقی تر نمونه‌ها نسبت به لایه سطحی کمتر است که دلیل آن حرارتی است که لایه‌های زیرین در هر پاس جوشکاری تجربه می‌کنند.

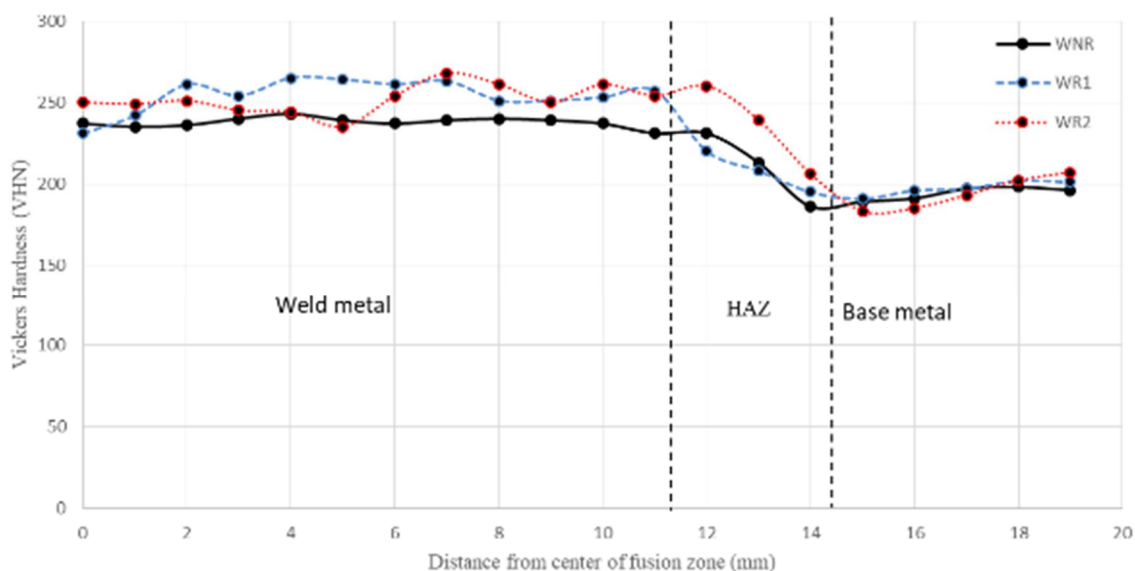
در شکل ۱۴ پروفایل سختی از قسمت میانی قطعات WR1، WNR و WR2 آورده شده است.

همان گونه که در این شکل مشخص است، سختی نمونه‌ها در فلز جوش در اثر جوشکاری مجدد افزایش یافته

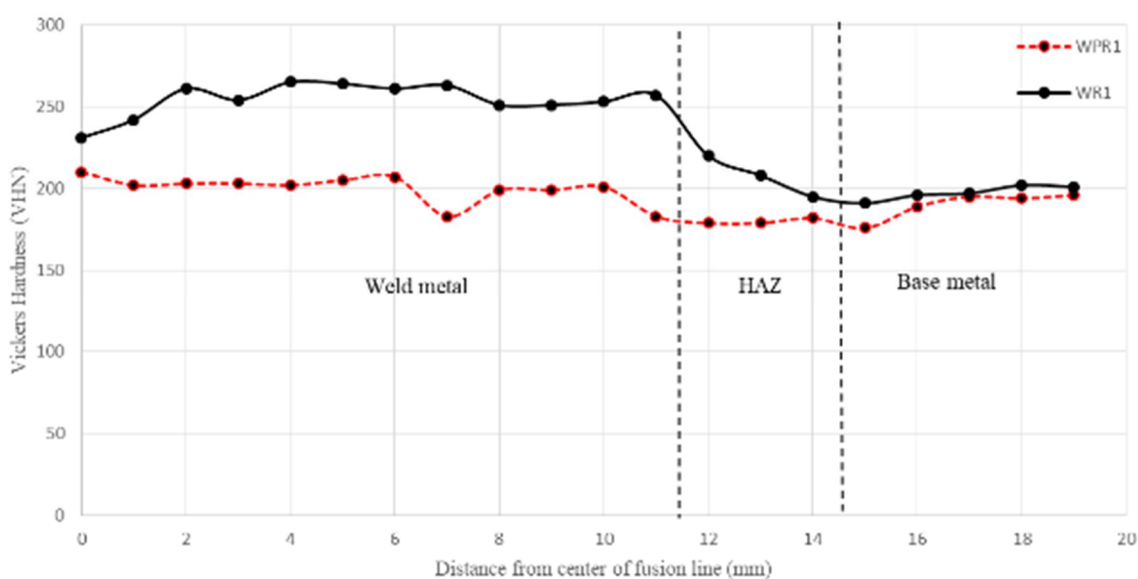
شبکه باعث ایجاد عیوب و ناپیوستگی می‌شود. وجود تنش باقیمانده یا اعمال تنش خارجی به قطعه جوش داده شده، با هیدروژن انباشته شده وارد عمل شده و با بزرگ کردن جدایش شبکه‌ای، آن را تبدیل به ترک می‌کند. در واقع ذرات هیدروژن با کاهش استحکام چسبندگی فلز در ایجاد ترک نقش دارند [۱].

قطعه کاهش یافته است و سختی در منطقه HAZ مجدداً نزدیک به سختی فلز پایه شده است.

زمانیکه منطقه جوش یا HAZ دارای ریزساختار سخت باشد، احتمال بروز ترک‌های هیدروژنی بالا می‌رود. ترک هیدروژنی در دمای اتاق متداول‌تر است. هیدروژن حل شده در فاز استنیت، حین سرد شدن، به مارتنزیت مستعد ترک تبدیل می‌شود. هیدروژن گیر افتاده‌ی پر انرژی با نفوذ داخل



شکل ۱۴- تاثیر جوشکاری های متوالی روی سختی

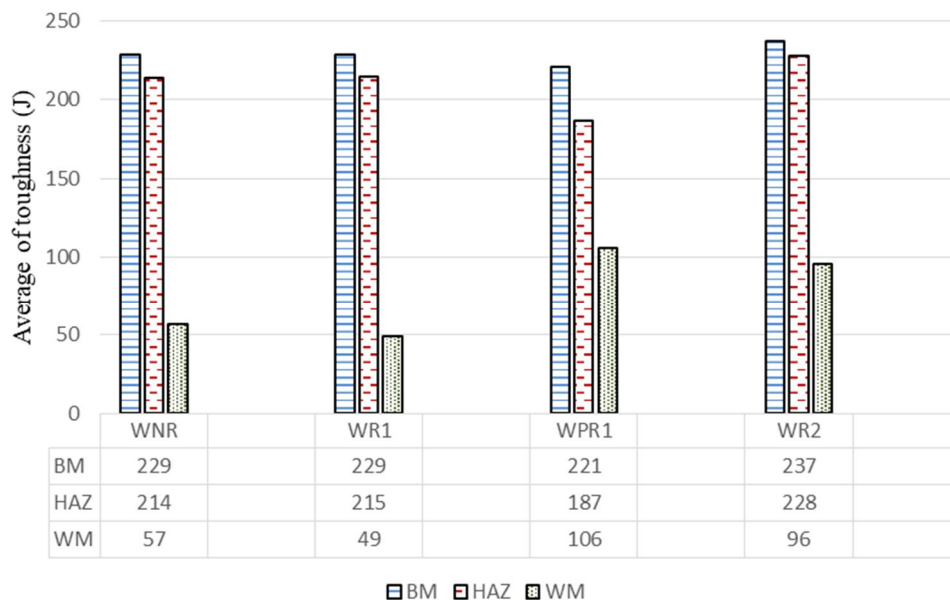


شکل ۱۵- تاثیر عملیات پس گرم قبل از جوشکاری تعمیراتی روی سختی

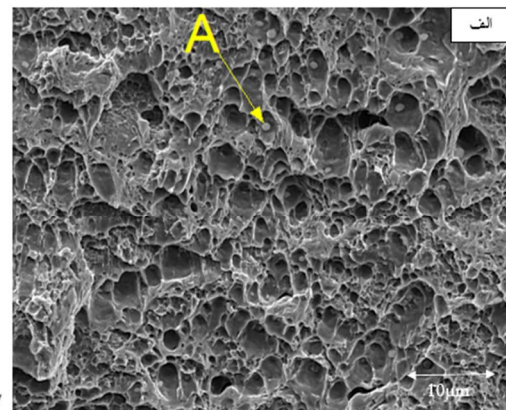
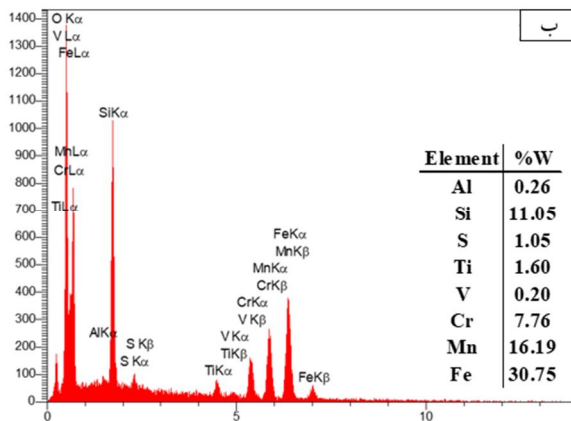
۳-۴- آزمون ضربه

آزمون ضربه شاریپی برای هر یک از نمونه‌ها در دمای محیط انجام شد و نتایج آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با استناد به نتایج، انرژی ضربه فلز جوش در تمام قطعات از فلز پایه و HAZ بطور محسوسی پایین‌تر است؛ همچنین جوشکاری‌های مجدد تاثیر نامطلوبی در انرژی ضربه نگذاشته‌اند. نکته دیگری که از نتایج می‌توان دریافت، این است که چقرمگی جوش در نمونه WPR1 بالاتر از WR1 است.

سطوح شکست نمونه‌های منطقه جوش و منطقه متأثر از جوش توسط میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفت. سطوح شکست در منطقه جوش در تمامی نمونه‌ها مشابه و همانند تصویر شکل ۱۷-الف است. وجود دیمپل‌ها در این شکل حاکی از آن است که شکست از نوع نرم است. نتایج طیف EDS مربوط به ذره A داخل یکی از دیمپل‌ها نیز در شکل ۱۷-ب آورده شده است و نشان دهنده این است که میزان سیلیسیم، کروم، منگنز و آهن در ذره A بالاتر از سایر عناصر است.



شکل ۱۶- نتایج آزمون ضربه نمونه‌های WNR، WR1، WPR1 و WR2



شکل ۱۷-الف) تصویر FESEM از سطح شکست فلز جوش در آزمون ضربه و ب) داده‌های EDS از ذره‌ای در موقعیت A

جوش در حدود ۶۸ درصد افزایش داشته است و از ۵۷ به ۹۶ ژول رسیده است که خود یک نتیجه ایده‌آل صنعتی بوده و بسیاری از نگرانی‌ها را در مورد جوشکاری تعمیراتی از بین می‌برد.

۴- جوشکاری‌های مجدد در کل باعث افزایش میانگین سختی در فلز جوش و ناحیه متأثر از آن می‌شود و گرا دیان سختی در این نمونه‌ها بالاتر است، نسبت به نمونه‌ای که یک‌بار جوشکاری شده است، ولی تاثیر نامطلوبی روی چقرمگی جوش نگذاشته است.

۵- عملیات پس‌گرم قبل از جوشکاری مجدد باعث می‌شود، سختی فلز جوش و ناحیه متأثر از آن به طور محسوسی پایین‌تر آید و اختلاف سختی که قبل از انجام عملیات پس‌گرم حدود ۲۷۰ ویکرز بود، با انجام پس‌گرم به کمتر از ۵۰ ویکرز رسید.

۵- مراجع

- [1] Pandey C, Saini N, Mahapatra MM, Kumar P (2016) Hydrogen induced cold cracking of creep resistant ferritic P91 steel for different diffusible Hydrogen levels in deposited metal. Int J Hydrogen Energy 41(39):17695-17712.
- [2] Das CR, Albert SK, Swaminathan J, Bhaduri AK, Murty BS (2013) Effect of boron on creep behaviour of inter-critically annealed modified 9Cr-1Mo steel. Proc. Eng. 6th Int. Conf. Creep, Fatigue and Creep Fatigue Interaction 55: 402-407.

شکست در ناحیه HAZ نیز در تمامی نمونه‌ها از نوع شکست نرم و همانند شکل ۱۸ الف است. دیمپل‌ها در این شکل به وضوح مشخص کننده این موضوع است. در شکل ۱۸ ب شکل نتایج طیف EDS مربوط به ذره A داخل یکی از دیمپل‌ها نشان می‌دهد که درصد وزنی عناصر آهن، منگنز، کروم و گوگرد در این ذره قابل توجه است.

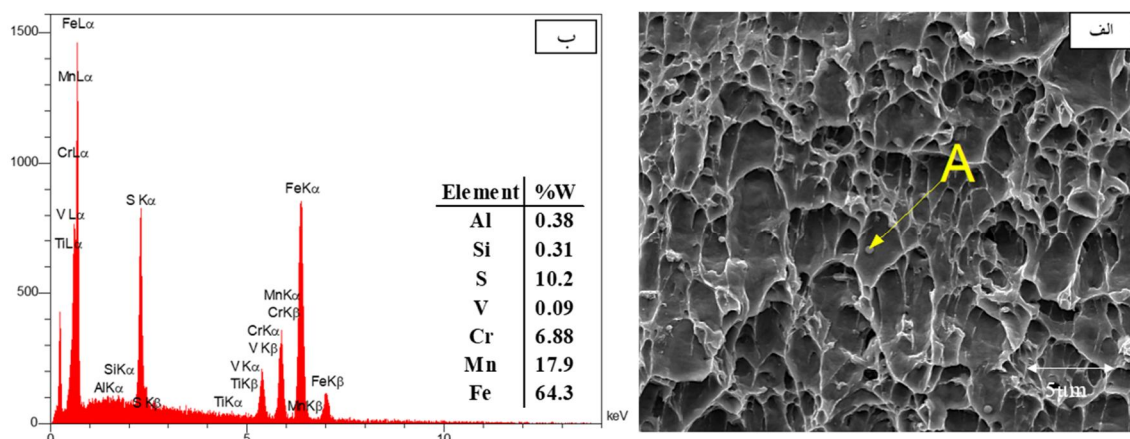
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از انجام جوشکاری تعمیراتی با دفعات تکرار و شرایط عملیات حرارتی مختلف، آزمون‌های کشش، ضربه و سختی‌سنجی در کنار بررسی‌های ریزساختاری روی قطعات انجام شد. با توجه به نتایج بدست آمده از این بررسی‌ها مشخص شد:

۱- بر اساس تصاویر FESEM در قطعات جوشکاری شده فولاد P91 انجام عملیات پس‌گرم باعث افزایش کاربید کروم $M_{23}C_6$ و کاربیدهای آهن MX در فلز جوش و HAZ می‌شود.

۲- استحکام تسلیم نمونه‌هایی که یک و دو مرتبه جوشکاری تعمیراتی شده اند، نسبت به نمونه‌ایی که تعمیرات نداشته است، بیش از به ترتیب ۳۰ و ۴۲ درصد افزایش داشته است.

۳- بر اساس نتایج آزمون ضربه، پس از انجام دو مرتبه جوشکاری تعمیراتی، چقرمگی فلز پایه و HAZ، تغییرات چندانی نداشته است، اما چقرمگی فلز



شکل ۱۸- الف) تصویر FESEM از سطح شکست HAZ در آزمون ضربه و ب) داده‌های EDS از ذره‌ای در موقعیت A

- [11] Magudeeswaran G, Balasubramanian V, Madhusudhan Reddy G (2008) Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments. *Int J Hydrogen Energy* 33(7): 1897-1908.
- [12] Yue X (2015) Investigation on heat-affected zone hydrogen-induced cracking of high-strength naval steels using the Granjon implant test. *Weld World* 59(1): 77-89.
- [13] Arivazhagan B, Vasudevan M (2014) A comparative study on the effect of GTAW processes on the microstructure and mechanical properties of P91 steel weld joints. *J Manuf Processes* 16(2): 305-311.
- [14] Vora J, Badheka V (2017) Experimental investigation on microstructure and mechanical properties of activated TIG welded reduced activation ferritic/martensitic steel joints. *J Manuf Processes* 25: 85-93.
- [15] Goyal S, Laha K, Chandravathi KS, Parameswaran P, Mathew MD (2011) Finite element analysis of type IV cracking in 2. 25Cr-1Mo steel weldment based on micro-mechanistic approach. *Philos Mag* 91(23): 3128-3154.
- [16] Parker J (2013) Factors affecting Type IV creep damage in Grade 91 steel welds. *Mater Sci Eng A* 578: 430-437.
- [17] Wang Y, Kannan R, Li L (2016) Characterization of as-welded microstructure of heat affected zone in modified 9Cr-1Mo-V-Nb steel weldment. *Mater Charact* 118: 225-234.
- [۱۸] مرادی م، خرم ع، عبدالهی ه (۱۳۹۶) بررسی خواص متالورژیکی و مکانیکی در قطعات جوشکاری شده به روش تیگ جهت جایگزینی مواد. *مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۷(۴): ۸۷-۹۵.
- [3] Das CR, Albert SK, Swaminathan J, Bhaduri AK, Murty BS (2012) Improvement in creep resistance in modified 9Cr1Mo steel weldment by boron addition. *Weld World* 56(7-8):10-17.
- [4] Thomas Paul V, Saroja S, Vijayalakshmi M (2008) Microstructural stability of modified 9Cr-1Mo steel during long term exposures at elevated temperatures. *J Nucl Mater* 378(1):273-281.
- [5] Serna JA, Afanador W (2001) Estimation of improved productivity based on Materials substitution in high temperature applications. *ASTM A-335*, 2(2):125-135.
- [6] Wheeldon J, Parkes J, Dillon D (2008) A proposed initiative by EPRI to advance deployment of ultra-supercritical pulverized coal power plant technology with near-zero emissions and CO₂ capture and storage. 5th Int. Conf. Adv. Mater. Tech. Fossil Power Plants, Marco Island, FL, USA, EPRI, 82-91.
- [7] Pandey C, Mahapatra MM, Kumar P, Saini N Srivastava A (2017) Microstructure and mechanical property relationship for different heat treatment and hydrogen level in multi-pass welded P91 steel joint. *J Manuf Processes* 28(1): 220-234.
- [۸] چرخ‌چی م، اکبری د (۱۳۹۶) بررسی اثر پیشگرم بر روی کاهش تنش‌های پسماند در جوشکاری تعمیراتی لوله‌های فولادی. *مهندسی مکانیک مدرس* ۱۰-۱: ۱۷(۱۲).
- [9] Coleman KK, Newell WF Jr (2007) P91 and beyond welding the new-generation Cr-Mo alloys for high-temperature service. *Weld J Aug*: 29-33.
- [10] Albert SK, Ramasubbu V, Sundar Raj SI, Bhaduri AA (2011) Hydrogen-assisted cracking susceptibility of modified 9Cr-1Mo steel and its weld metal. *Weld World* 55(7-8): 66-74.