

## بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهم جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ به فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای API X65\*

مقاله پژوهشی

محمود شریفی تبار<sup>(۱)</sup> سحر خواجه محمودی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این پژوهش اتصال غیرهم‌جنس فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X65 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ با استفاده از فرایند جوش‌کاری قوسی دستی با دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ انجام شد. در ادامه، ساختار، ریزساختار، سختی و استحکام کششی اتصالات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساختار هر دو اتصال در ناحیه جوش حاوی فازهای آستنیت و دلتا فریت بود. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که درصد فاز فریت در جوش الکتروود ۳۰۹ بالاتر از مقدار این فاز در جوش الکتروود ۳۰۸ بود. در هر دو اتصال یک لایه واسط حاوی فازهای فریت و مارتنزیت در فصل مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X65 تشکیل شد. نتایج آزمون سختی نشان داد که مقدار سختی فلز جوش دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ به ترتیب ۳۰ و ۳۸ درصد بیشتر از فولاد کم‌آلیاژ بود. نتایج آزمون کشش بیانگر آن بود که استحکام کششی جوش تولیدشده با الکتروود ۳۰۹ در حدود ۱/۵ درصد بالاتر از الکتروود ۳۰۸ و مقدار قابلیت تغییر طول ۲۶ درصد کم‌تر بود. شکست نهایی در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ اتفاق افتاد. بررسی سطوح شکست نمونه‌ها بیانگر ترکیب مکانیزم شکست نرم و ترد در نمونه‌های آزمون کشش بود.

**واژه‌های کلیدی** فولاد زنگ‌نزن، اتصال غیر هم‌جنس، استحکام، سختی، ریزساختار.

### مقدمه

خواهد بود. فولاد میکروآلیاژی API 5L-X65 با دارا بودن استحکام مکانیکی قابل توجه در تولید لوله‌های انتقال نفت و گاز به کار برده می‌شود. این فولاد دارای ریزساختار فریتی-پرلیتی است که حضور عناصر میکروآلیاژی تیتانیم، آلومینیوم، نیوبیوم و وانادیوم سبب دگرگونی آستنیت به فریت ریز دانه می‌شود [۱ و ۲]. از سوی دیگر، فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ جزو فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی است که حضور مقادیر اندک تیتانیم در ترکیب آن سبب مقاومت عالی در برابر خوردگی بین دانه‌های در محدوده دمایی رسوب کاربید کرم (۵۵۰ تا ۷۹۰ سانتی‌گراد) شده‌است. از این رو، اتصال غیرمشابه این دو فولاد می‌تواند راه‌حل برخی از مشکلات انتخاب مواد در صنایع مختلف نظیر نفت، گاز، پترو شیمی، نیروگاه‌های حرارتی و صنایع غذایی باشد [۱]. [۳-۹].

انتخاب مواد مهندسی برای ساخت قطعات در صنایع مختلف به شرایط کاری و ویژگی‌های فلزات در دسترس و همچنین جنبه‌های اقتصادی بستگی دارد. در برخی موارد ساخت تمامی بخش‌های یک سازه با استفاده از فلزات دارای ویژگی‌های خاص مانند فولادهای زنگ‌نزن سبب افزایش هزینه مواد اولیه می‌گردد؛ از این رو، به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها، می‌توان موضعی را که وجود فولاد زنگ‌نزن ضرورتی ندارد، با فولاد ساده کربنی و یا کم‌آلیاژ جایگزین کرد. در این گونه موارد لزوم ایجاد اتصال مناسب بین آن‌ها بسیار مهم است. از آنجا که ترکیب شیمیایی فولادهای کم‌آلیاژ در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن بسیار متفاوت است، کنترل واکنش‌ها در فصل مشترک آن‌ها و بررسی تغییرات ساختاری و ریزساختاری در ناحیه جوش و همچنین تأثیر این تغییرات بر خواص اتصال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۴/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۲) کارشناسی مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

فلز پرکننده برای اتصال غیرمشابه فلزات به جنس فلز پایه وابسته است و در هر مورد باید فلز پرکننده مناسب انتخاب شود. از آن جا که تاکنون در منابع تحقیقاتی داخلی و خارجی قابل دسترس، مطالعه عمیق و علمی در خصوص اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ و فولاد X65 به روش جوش کاری الکترو دستی به عنوان یکی از روش‌های ارزان و در دسترس اتصال مواد انجام نشده است، از این رو هدف از این تحقیق بررسی تأثیر نوع فلز پرکننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی این اتصال غیرمشابه است. بدین منظور، الکترودهای فولاد زنگ‌نزن ۳۰۸ و ۳۰۹ به عنوان دو فلز پرکننده رایج اتصال فولادهای زنگ‌نزن به فولاد کربنی برای برقراری اتصال انتخاب شدند. سپس، ساختار، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات ایجادشده مورد بررسی قرار گرفت تا الکترودهای مناسب از بین این دو گزینه برای اتصال فولادهای مذکور انتخاب شود.

#### مواد و روش تحقیق

به منظور اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X65، ورق‌هایی با ابعاد ۱۲×۱۰۰×۳۰۰ میلی-متر مکعب از هر آلیاژ تهیه شد. ترکیب شیمیایی این ورق‌ها که توسط آنالیز طیف‌سنج نشر اتمی اندازه‌گیری شد، در جدول (۱) ارائه شده است. پیش از انجام فرایند جوش کاری تمامی سطوح ورق‌های مذکور به منظور حذف آلودگی‌های سطحی و اکسیدها به طور کامل سنگ زده شد و در نهایت توسط استون شستشو داده شد.

جوش کاری قطعات با استفاده از روش جوش کاری قوسی دستی انجام شد. بدین منظور از دو نوع الکترودهای جوش کاری با کدهای E308H و E309L ساخت شرکت الکتروده سازی یزد و قطر ۴ میلی‌متر استفاده شد. این دو الکتروده به عنوان فلز پرکننده رایج برای اتصال فولادهای زنگ‌نزن به فولادهای کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جدول (۲) ترکیب شیمیایی فلز جوش خالص حاصل از این الکترودها را که توسط شرکت سازنده ارائه شده است نشان می‌دهد [15].

تاکنون در زمینه اتصال غیرهمجنس فولادهای زنگ‌نزن ۳۲۱ و X65 به سایر آلیاژهای مهندسی تحقیقاتی انجام شده است. به عنوان مثال ژانگ (Zhang) و همکاران [10-12] ریزساختار و خواص خوردگی جوش ورق‌های دولایه فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵/۶۵X را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها روشی ترکیبی از جوش کاری لیزر/جوش کاری قوسی فلز-گاز محافظ خنثی (MIG) را برای جوش کاری این ورق‌ها پیشنهاد دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که توان حرارتی ترکیبی دو فرایند یکی از پارامترهای مؤثر بر اندازه دانه و توزیع عناصر آلیاژی در فازهای فریت و آستنیت است [12]. سایرام (Sayiram) و آریواژاگان (Arivazhagan) [13] تغییرات ریزساختاری در ناحیه اتصال غیرهمجنس آلیاژ اینکونل ۸۰۰ و فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ را مورد بررسی قرار دادند. دو فلز پرکننده از جنس آلیاژ اینکونل ۸۲ و اینکونل ۶۱۷ برای اتصال این قطعات به روش جوش کاری قوسی با الکتروده تنگستنی و گاز محافظ (GTAW) استفاده شد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که تغییر در نوع فلز پرکننده تأثیر قابل توجهی بر نوع فازهای تشکیل شده در ناحیه جوش و نحوه توزیع عناصر آلیاژی دارد. در نهایت فلز پرکننده اینکونل ۶۱۷ به عنوان فلز مناسب برای این اتصال غیرمشابه پیشنهاد شد. در تحقیق دیگری شارما (Sharma) و همکارانش [14] تأثیر ترکیب شیمیایی فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرهمجنس ایجادشده بین آلیاژ پایه نیکل C-276 و فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ را به روش جوش کاری قوسی با الکتروده تنگستنی و گاز محافظ (GTAW) مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تأثیر تغییر ریزساختار بر خواص مکانیکی و خوردگی ناحیه جوش مورد بررسی قرار گرفت. سه فلز پرکننده متفاوت از جنس آلیاژهای پایه نیکل و یک فلز پرکننده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ انتخاب شد. نتایج بررسی‌های آن‌ها نیز نشان داد که تغییر ترکیب شیمیایی فلز پرکننده می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر خواص ناحیه اتصال داشته باشد. در نهایت فلز پرکننده ER-NiCrMo-4 به عنوان فلز پرکننده مناسب برای اتصال این فلزات غیرمشابه پیشنهاد گردید. نتایج بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که انتخاب نوع

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مواد اولیه

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)										
Fe	Nb	V	Ti	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C	
مابقی	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۳۲	۹/۶۸	۰/۲۸	۱۷/۲۰	۱/۱۳	۰/۴۱	۰/۰۳	فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱
مابقی	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۸	۱/۲۰	۰/۲۰	۰/۱۰	فولاد X۶۵

جدول ۲ ترکیب شیمیایی الکترودهای جوش کاری (گزارش شده توسط شرکت الکتروسازی یزد) [15]

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)										
Fe	Nb	Cu	Mo	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C	
مابقی	۰/۰۱	<۰/۵	<۰/۵	۱۰/۰	۰/۰۵	۱۹/۰	۱/۵	۰/۵	۰/۰۷	الکتروده E308H
مابقی	۰/۰۲	<۰/۳	<۰/۳	۱۳/۰	۰/۰۸	۲۴/۰	۰/۹	۰/۷	<۰/۰۳	الکتروده E309L

(Scan step time) در محدوده زاویه ۲۰ تا ۸۰ درجه انجام شد. بدین منظور نمونه‌های مدنظر به‌طور کامل از فلز جوش استخراج شد. ترکیب شیمیایی فلز جوش توسط دستگاه کوانتومتری PMI MASTER SMART اندازه‌گیری شد. برای بررسی ریزساختار ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت، نمونه‌های مختلف از نواحی متفاوت سطح مقطع جوش تهیه شد و پس از آماده‌سازی اولیه توسط سنباده‌های ۱۸۰ تا ۱۵۰۰ با استفاده از نمد و ذرات آلومینا با اندازه ۵۰ نانومتر پولیش کاری شدند. به دلیل مقاومت به خوردگی متفاوت فولاد زنگ‌نزن با فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالا، از دو نوع محلول حکاکی متفاوت برای آشکار سازی ریز ساختار استفاده شد. نایتال (Nital) ۳ درصد (۳ درصد اسید نیتریک و ۹۷ درصد متانول) به‌عنوان محلول حکاکی پایه برای آشکار سازی ریزساختار فولاد X۶۵ و محلول کالینگ (Kalling's reagent) (۳۳ میلی‌لیتر آب، ۱/۵ گرم  $\text{CuCl}_2$ ، ۳۳ میلی‌لیتر متانول و ۳۳ میلی‌لیتر HCl) برای آشکار سازی ریز ساختار و فازهای موجود در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، ریز ساختار نواحی مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی TESCAN MIRA3 FESEM مجهز به

براساس طراحی انجام‌شده، جوش کاری با استفاده از طراحی اتصال جناقی دوطرفه انجام شد. در مجموع از چهار پاس برای پرکردن درز اتصال استفاده شد. دمای بین پاسی نیز در حدود ۱۵۰ درجه سلسیوس انتخاب شد. هم‌چنین، برای هر دو نوع الکتروده، محدوده جریان جوش کاری و نوع قطبیت براساس پیشنهاد سازنده مطابق جدول (۳) انتخاب شد.

جدول ۳ مشخصات فرایند جوش کاری مورداستفاده برای اتصال فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ به فولاد X۶۵

الکتروده	الکتروده	متغیر جوش کاری
۳۰۹	۳۰۸	جریان جوش کاری (آمپر)
۱۴۵	۱۳۵	ولتاژ جوش کاری (ولت)
۳۰	۲۶	سرعت جوش کاری (سانتی‌متر بر دقیقه)
۱۷-۱۶	۱۷-۱۶	قطر الکتروده (میلی‌متر)
۴	۴	نوع قطبیت
DC <sup>+</sup>	DC <sup>+</sup>	

به‌منظور شناسایی نوع فازهای تشکیل شده در ناحیه جوش، آنالیز پراش اشعه ایکس با طول موج تک‌رنگ مس (۱/۵۴۱۸۷۴ انگستروم)، اندازه فاصله روبش (Scan step size) ۰/۰۲ درجه و زمان روبش ۱ ثانیه در هر فاصله

درصد حضور فلز پایه در فلز مذاب توسط متغیری به نام درصد رقت (Dilution) سنجیده می‌شود. هرچه درصد رقت بیشتر باشد میزان مذاب حاصل از فلز پایه در ترکیب مذاب کل بیشتر است. رقت سبب می‌شود تا ترکیب فلز مذاب تغییر کند و از این رو سبب ایجاد ریزساختارهای متفاوت در فلز جوش خواهد شد. به منظور بررسی دقیق‌تر ترکیب شیمیایی فلز جوش پس از جوش کاری از آنالیز کوانتومتری استفاده شد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در صد عناصر آلیاژی کرم و نیکل در فلز جوش حاصل از الکتروود ۳۰۹ بیشتر از فلز جوش الکتروود ۳۰۸ است. نکته دیگر آن است که مقدار عنصر نیکل از ۱۰ درصد وزنی در ترکیب الکتروود ۳۰۸ به ۹/۳ درصد در فلز جوش کاهش یافته است. در خصوص الکتروود ۳۰۹ نیز در صد نیکل از ۱۳ در صد وزنی در ترکیب الکتروود به ۱۲/۷ درصد وزنی در فلز جوش کاهش یافت. اگر در صد بازبایی نیکل به عنوان یک فلز نجیب حدود ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شود، ملاحظه می‌شود که میزان کاهش درصد نیکل در هر دو جوش کم‌تر از ۱۰ درصد است. واضح است که درصد نیکل در فولاد کم آلیاز استحکام بالا کم‌تر از ۰/۱ درصد است. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که میزان رقت در هر دو اتصال در مرکز حوضچه مذاب اندک و ناچیز است.

آشکارساز طیف‌سنجی انرژی SAMX (EDS)، برای اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی فازها، مطالعه شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصالات از دو آزمون کشش و سختی سنجی استفاده شد. آزمون کشش بر روی نمونه‌های عرضی توسط دستگاه آزمون کشش Universal شرکت کوپا (Koop) با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نمونه‌های آزمون به صورت عمود بر درز اتصال و به نحوی که فلز جوش در مرکز نمونه قرار داشت، آماده‌سازی شد. برای هر اتصال سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. هم‌چنین، برای تعیین مکانیزم شکست، سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM KYKY EM2900) بررسی شد. مقدار سختی نقاط مختلف جوش نیز با استفاده از دستگاه سختی‌سنج ویکرز با بار اعمالی ۵۰۰ گرم برای مدت زمان ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شد و منحنی تغییرات سختی بر حسب فاصله از سمت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ تا فولاد X۶۵ برای هر اتصال رسم شد.

## نتایج و بحث

### ترکیب شیمیایی فلز جوش

در روش جوش کاری قوسی دستی ذوب شدن هم‌زمان الکتروود و فلز پایه و اختلاط این دو مذاب سبب تغییر ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکتروود می‌شود.

جدول ۴ نتایج آنالیز کوانتومتری ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکترودهای

۳۰۸ و ۳۰۹

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)									
Fe	Nb	V	Ti	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C
الکتروود ۳۰۸	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۲	۹/۳	۰/۰۵	۱۸/۸۴	۱/۵۶	۰/۲۱	۰/۰۶
الکتروود ۳۰۹	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۱	۱۲/۷۰	۰/۰۸	۲۳/۳	۰/۸۵	۰/۳۶	۰/۰۳

در شکل (۲-ب) از نوع اسکلتی است. هم چنین میزان پیوستگی این فاز در فلز جوش الکتروود ۳۰۹ بسیار بیشتر است.

در جوش های چند پاسه، حرارت حاصل از یک پاس جوش کاری می تواند سبب بازگرمایش پاس های زیرین و تغییر ریزساختار آن ها گردد. شکل های (۲-ج) و (۲-د) به ترتیب تصاویر میکروسکوپی ناحیه بازگرمایش ساختار جوش الکتروودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ را نشان می دهد. در خصوص الکتروود ۳۰۸، همان گونه که در شکل (۲-ج) ملاحظه می شود، در اثر بازگرمایش در صد فاز ثانویه کاهش می یابد و مورفولوژی آن در برخی از نقاط از کرمی شکل به کروی تغییر کرده است. در سوی مقابل شکل (۲-د) نشان می دهد که حرارت سبب کاهش پیوستگی فاز ثانویه در ناحیه بازگرمایش جوش الکتروود ۳۰۹ شده است.

به منظور بررسی دقیق تر این فازها، ترکیب شیمیایی آن ها با استفاده از آنالیز طیف سنج انرژی به صورت نیمه کمی تعیین شد. با مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی نیمه کمی در جدول (۵) مشاهده می شود که درصد کرم و مولیبدن در فاز کرمی شکل (نقطه A) و اسکلتی (نقطه C) در مقایسه با فاز زمینه به میزان قابل توجهی افزایش یافته و درصد نیکل کم تر شده است.

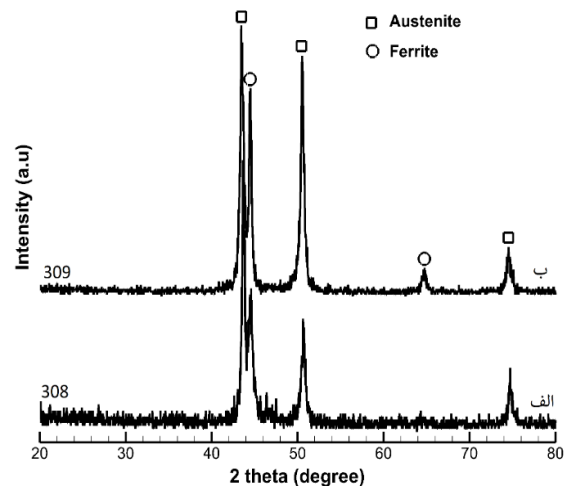
جدول ۵ ترکیب شیمیایی فازهای نشان داده شده در شکل ۲

مکان آنالیز	کرم	نیکل	مولیبدن	سیلیسیم	آهن
نقطه A	۲۴/۷	۳/۲	۳/۳	۰/۹	باقی
نقطه B	۱۹/۳	۸/۱	۱/۲	۰/۴	باقی
نقطه C	۲۹/۳	۷/۹	۰/۷	۰/۳	باقی
نقطه D	۲۲/۷	۱۳/۶	۰/۹	۰/۸	باقی

در ساختار فولادهای زنگ نزن کرم و مولیبدن عناصر پایدارکننده فاز فریت و نیکل عنصر پایدارکننده فاز آستنیت است [16]. به عبارت دیگر، عنصر کرم و مولیبدن تمایل به رسوب در فاز فریت را دارند. از این رو با در نظر گرفتن نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس در شکل (۲) و نتایج آنالیز

### بررسی ریزساختار و فازهای تشکیل شده در فلز جوش

شکل (۱) الگوی پراش اشعه ایکس فلز جوش حاصل از دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ در اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای X65 را نشان می دهد.



شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس فلز جوش حاصل از دو الکتروود، (الف) ۳۰۸ و (ب) ۳۰۹ پس از اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای X65

ساختار جوش حاصل از هر دو الکتروود شامل فازهای آستنیت (شماره کارت ۰۲۹۷-۰۳-۰۰) و دلتا فریت (شماره کارت ۰۳۹۶-۰۳۴-۰۰) است. نکته قابل توجه آن است که شدت پیک های مشخصه فاز دلتا فریت در فلز جوش الکتروود ۳۰۹ در مقایسه با الکتروود ۳۰۸ بالاتر است. از آنجا که شدت پیک مشخصه فازها در آنالیز پراش اشعه ایکس متناسب با مقدار فاز است، از این رو می توان نتیجه گرفت که در صد فاز دلتا فریت در فلز جوش الکتروود ۳۰۹ در مقایسه با الکتروود ۳۰۸ بالاتر خواهد بود.

شکل (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فلز جوش الکتروودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ در پاس آخر را نشان می دهد. در شکل (۲-الف) تصویر یک فاز تیره با دو مورفولوژی کرمی شکل و لایه ای در درون زمینه قابل تشخیص است؛ اما، مورفولوژی این فاز

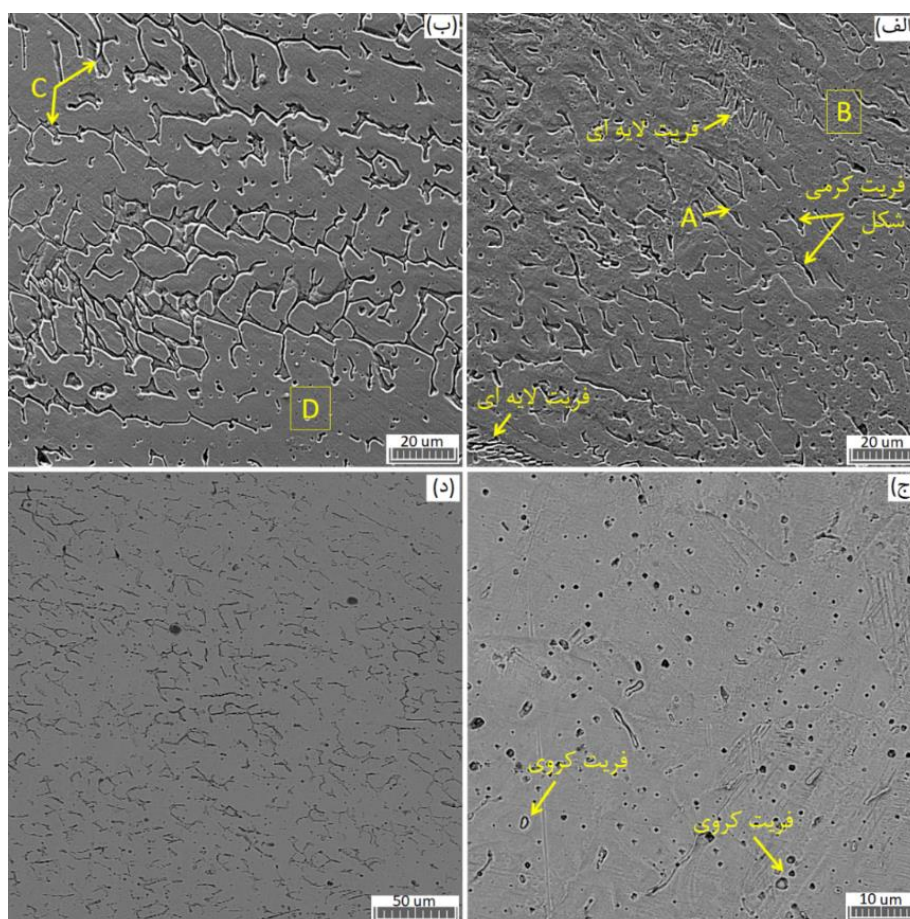
فولادها مطرح می‌باشد. امروزه به‌طور کلی پذیرفته شده است که برای جلوگیری از ترک‌خوردگی انجمادی، ساختار فلز جوش فولادهای زنگ‌نزن باید حاوی مقداری (۵ تا ۱۰ درصد) فاز دلتا فریت باشد. درصد فاز دلتا فریت و همچنین شکل آن به میزان کرم معادل ( $Cr_{eq}$ ) و نیکل معادل ( $Ni_{eq}$ ) فولاد و پارامتری تحت عنوان نسبت کرم معادل به نیکل معادل ( $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ ) بستگی دارد. مقدار کرم معادل و نیکل معادل را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد [16]:

$$[Cr]_{eq}\% = W_{Cr}\% + W_{Mo}\% + 1.5W_{Si}\% + 0.5W_{Nb}\% + 2W_{Ti}\% \quad (1)$$

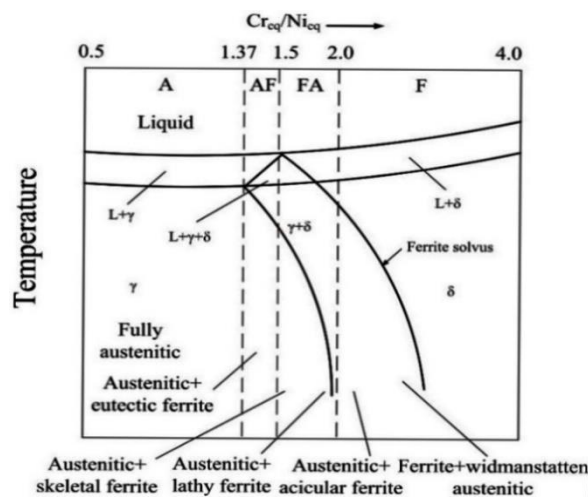
$$[Ni]_{eq}\% = W_{Ni}\% + 0.5W_{Mn}\% + 30W_{C}\% \quad (2)$$

شیمیایی می‌توان نتیجه گرفت که ساختار ناحیه جوش ایجاد شده توسط هر دو فلز پرکننده ۳۰۸ و ۳۰۹ حاوی فاز دلتا فریت توزیع شده در زمینه آستنیتی است. با بررسی دقیق‌تر تصاویر میکرو سکویی ساختار این نمونه‌ها می‌توان دریافت که درصد فاز دلتا فریت در ساختار فلز جوش الکتروود ۳۰۹ بالاتر است. اندازه‌گیری درصد فازها در تصاویر متالوگرافی با استفاده از نرم‌افزار Image J نشان داد که درصد فاز فریت در ساختار جوش الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ به ترتیب برابر با ۶/۵ و ۱۳/۵ درصد می‌باشد که این نتایج با شدت نسبی پیک‌های مشخصه فاز دلتا فریت در الگوی پراش اشعه ایکس مطابقت دارد.

در هنگام جوش کاری فولادهای زنگ‌نزن، تشکیل ترک انجمادی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات فرایندی این



شکل ۲ اشکال مختلف فاز فریت در (الف) ریزساختار پاس آخر در الکتروود ۳۰۸، (ب) ریزساختار پاس آخر در الکتروود ۳۰۹، (ج) ریزساختار ناحیه بازگرمایش فلز جوش الکتروود ۳۰۸، (د) ریزساختار ناحیه بازگرمایش فلز جوش الکتروود ۳۰۹

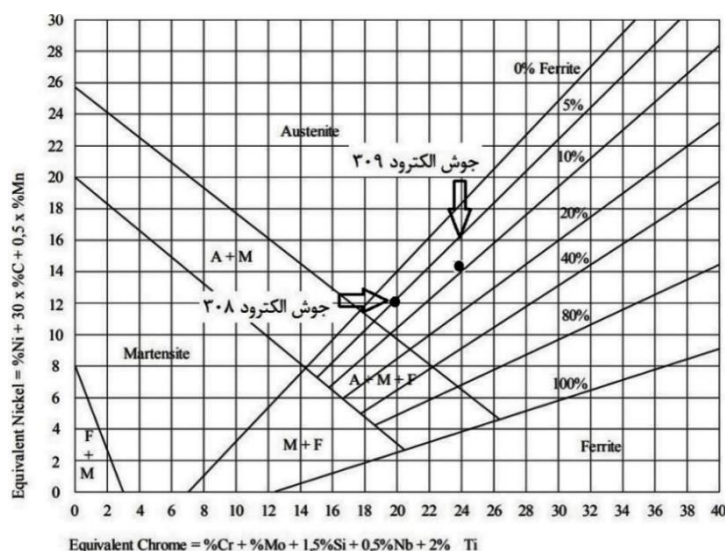


شکل ۳ وابستگی نحوه انجماد مذاب فولادهای زنگ‌نزن به ترکیب شیمیایی [17]

آستنیت کامل نمی‌شود و از این رو مقداری فاز دلتا فریت در ساختار جوش باقی خواهد ماند. نکته دیگری که در شکل (۳) نشان داده شده است، وابستگی ظاهر فریت به نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  است. از آنجاکه این نسبت برای هر دو فلز مذاب حاصل از الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ نزدیک به هم و بین ۱/۵ و ۲ قرار داشت، انتظار می‌رفت که فاز فریت باقی‌مانده در ساختار دارای مورفولوژی اسکلتی (کرمی شکل) و لایه‌ای باشد که با نتایج تجربی هم‌خوانی داشت. هم‌چنین، بازگرمایش جوش چندپاسه سبب انحلال جزئی فریت، تشکیل مورفولوژی فریت کروی و کاهش پیوستگی این فاز شد.

مقدار فاز دلتا فریت موجود در ساختار جوش فولادهای زنگ‌نزن آستینیتی را می‌توان با در نظر گرفتن مقادیر کرم معادل و نیکل معادل با استفاده از نمودار شافلر (Schaeffler diagram) تخمین زد [17]. شکل (۴) نمودار شافلر را نشان می‌دهد. ترکیب فلز جوش حاصل از دو الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ روی این نمودار نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقدار فریت در فلز جوش الکترودهای ۳۰۸ در حدود ۶ درصد و در الکترودهای ۳۰۹ در حدود ۹ درصد تخمین زده می‌شود. با جمع‌بندی نتایج بیان‌شده می‌توان دریافت که مقدار فاز دلتا فریت در ساختار جوش هر دو الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ به میزان لازم برای جلوگیری از ایجاد ترک انجمادی می‌باشد.

شکل (۳) وابستگی نحوه انجماد جوش فولادهای زنگ‌نزن را به مقدار  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  در شرایط تعادلی به صورت طرح‌واره نشان می‌دهد. انجماد اولیه در حین جوش کاری می‌تواند با ایجاد فاز فریت و یا آستینیت آغاز شود. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در مقادیر  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  پایین، شروع انجماد با تشکیل فاز آستینیت خواهد بود، اما در نسبت‌های بالای  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  نحوه انجماد تغییر می‌کند و با تشکیل فاز فریت آغاز خواهد شد. البته باید به این نکته نیز توجه داشت که در مقدار  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  ثابت، افزایش درصد آهن سبب باریک‌شدن منطقه دوفازی فریت+آستینیت می‌شود و می‌تواند بر میزان و مورفولوژی فریت تأثیرگذار باشد [17]. مقدار کرم معادل و نیکل معادل برای جوش حاصل از الکترودهای ۳۰۸ به ترتیب برابر ۱۹/۲۳ و ۱۱/۸۷ درصد وزنی و برای الکترودهای ۳۰۹ برابر با ۲۳/۹۵ و ۱۴/۰۲ درصد وزنی محاسبه شد. با در نظر گرفتن مقادیر محاسبه شده، نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  برای فلز جوش حاصل از الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ به ترتیب برابر با ۱/۶۲ و ۱/۷۰ خواهد بود. مقادیر محاسبه شده بیانگر آن است که انجماد مذاب هر دو الکترودها با فریت آغاز شده است. در ادامه سرد شدن و کاهش دما آلیاژ منجمدشده وارد ناحیه دوفازی فریت و آستینیت شده است. چنانچه سرعت سرد شدن به صورت تعادلی و آهسته باشد، با ادامه کاهش دما فاز فریت به آستینیت تبدیل می‌شود، اما در فرایندهایی مانند جوش کاری که سرعت سرد شدن غیرتعادلی است دگرگونی فریت به



شکل ۴ نمودار شافلر [17]

فصل مشترک فلز جوش و فولاد X65 متفاوت است و از سمت فولاد X65 به سمت فلز جوش در عرض فصل مشترک به صورت تدریجی افزایش یافته است. در مرکز این لایه واسط غلظت عناصر آهن، کرم و نیکل به ترتیب برابر با ۸۴/۵، ۷/۶ و ۲/۹ در صد وزنی است. با توجه به در صد این عناصر و محاسبه کرم معادل و نیکل معادل، نوع فازهای موجود در فصل مشترک با استفاده از نمودار شافلر ترکیبی از فریت و مارتنزیت تعیین شد. این نتایج نشان می دهد که اتصال فلز جوش فولاد ۳۰۸ با فولاد X65 توسط یک لایه واسط حاوی فازهای فریت و مارتنزیت برقرار شده است.

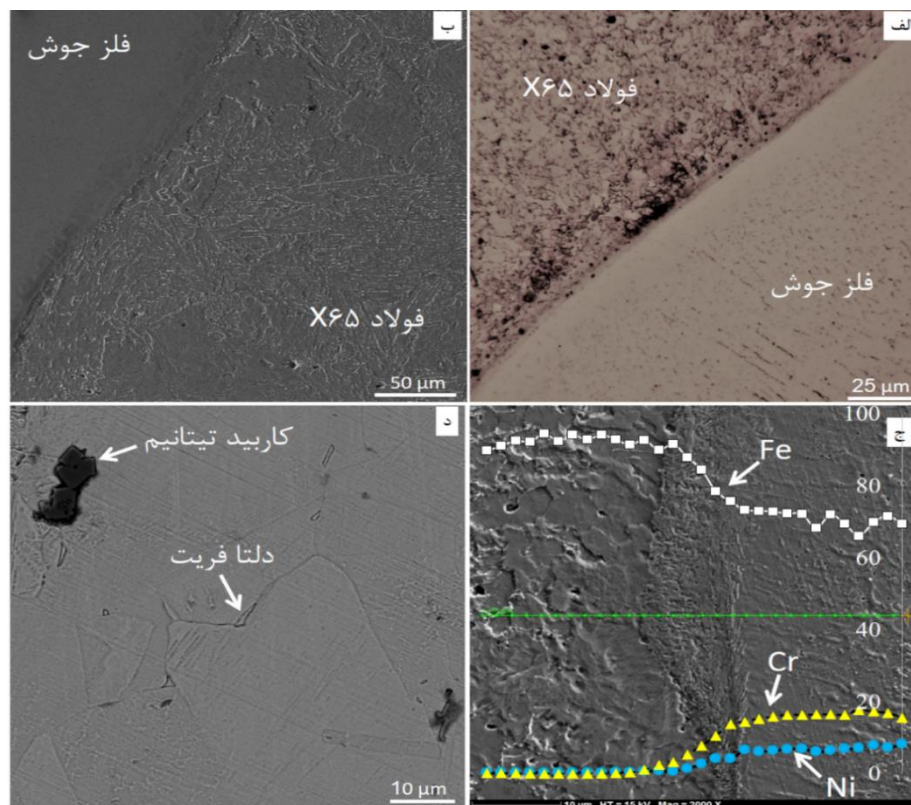
تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن ۳۲۱ شکل (۵-د) نشان دهنده حضور ذرات تیره رنگ با مورفولوژی مکعبی و فاز دلتا فریت در ناحیه متأثر از حرارت است. نتایج آنالیز طیف سنج انرژی نشان داد که ذرات تیره حاوی ۸۴ درصد وزنی تیتانیم، ۱۱ درصد وزنی کربن و حدود ۳ درصد مولیبدن است. در صد سایر عناصر نیز کم تر از یک در صد است. از این رو می توان نتیجه گرفت که ذرات تیره فاز کاربید تیتانیم است که در فولاد ۳۲۱ با افزودن تیتانیم به ترکیب فولاد برای پایداری کربن و جلوگیری از خوردگی مرزخانه ها تشکیل می شوند.

### ریزساختار فصل مشترک فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت

**الکتروود ۳۰۸.** تصویر میکروسکوپی نوری ناحیه متأثر از حرارت فولاد X65 جوش کاری شده با الکتروود ۳۰۸ در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. مرز ذوب یک نواخت و عاری از عیب است. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مرز ذوب و ناحیه متأثر از حرارت در پاس آخر و ناحیه بازگرمایش به ترتیب در شکل های (۵-ب) و (۵-ج) نشان داده شده است.

شایان ذکر است که در پاس نهایی، فصل مشترک ناحیه ذوب و فلز پایه به صورت واضح قابل تفکیک است؛ اما در ناحیه بازگرمایش، همان طور که در شکل (۵-ج) نشان داده شده است، گرمایش مجدد منجر به تشکیل یک لایه واسط بین فلز پایه و حوضچه مذاب شده است. به منظور شناسایی فازهای تشکیل شده در فصل مشترک، تغییرات غلظت عناصر آهن، کرم و نیکل در عرض فصل مشترک جوش و فولاد X65 به صورت خطی اندازه گیری شد. نتایج این اندازه گیری در شکل (۵-ج) به صورت منحنی تغییرات غلظت عناصر (در صد وزنی) بر حسب فاصله رسم شده است. فولاد X65 غنی از آهن و فلز جوش علاوه بر آهن، حاوی عناصر نیکل (حدود ۸ درصد وزنی) و کرم (حدود ۱۸ درصد وزنی) است. اما، غلظت این عناصر در



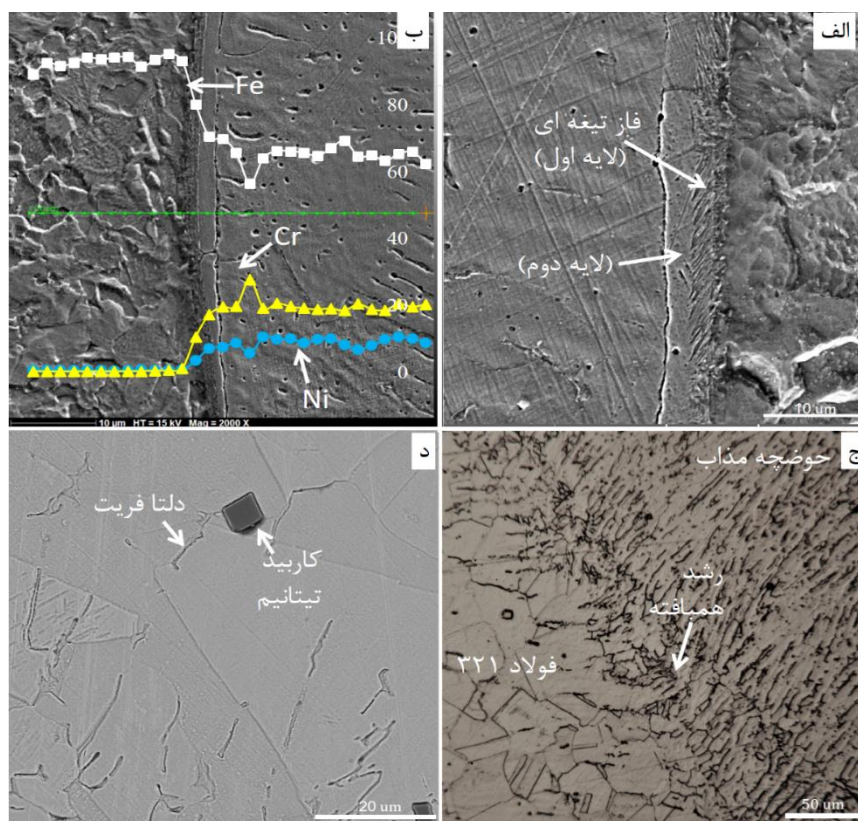


شکل ۵ (الف) تصویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک جوش الکتروود ۳۰۸ و ناحیه متأثر از حرارت، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ناحیه متأثر از حرارت فولاد X65 در پاس نهایی، (ج) تشکیل لایه واسط در فصل مشترک فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت در اثر بازگرمایش و تغییرات درصد وزنی عناصر آلیاژی در عرض این لایه، (د) حضور ذرات کاربید تیتانیم و تشکیل فاز دلتا در ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱

ترکیب شیمیایی نیمه‌کمی این نواحی در جدول (۶) ارائه شده‌است.

با محاسبه مقدار کرم معادل و نیکل معادل در این دو لایه و مراجعه به نمودار شافلر مشخص شد که لایه اول با مورفولوژی تیغه‌ای حاوی فاز مارتنزیت و لایه دوم نیز حاوی ترکیبی از فازهای آستنیت، مارتنزیت و فریت است. این نتایج نشان داد که در هنگام جوش کاری فولاد X65 با هر دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹، لایه حاوی فاز مارتنزیت در فصل مشترک فولاد X65 و فلز جوش تشکیل می‌شود. فصل مشترک فلز جوش الکتروود ۳۰۹ با فولاد ۳۲۱ مشابه الکتروود ۳۰۸ است و همان‌گونه که در شکل (۶-ج) نشان داده شده‌است، دانه‌های آستنیت به صورت هم‌بافته در فصل مشترک رشد کرده‌اند. هم‌چنین، شکل (۶-د) نشان‌دهنده حضور ذرات کاربید تیتانیم با مورفولوژی مکعبی و فاز دلتا فریت در ناحیه متأثر از حرارت است.

**الکتروود ۳۰۹.** تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ناحیه متأثر از حرارت فولاد X65 جوش کاری شده با الکتروود ۳۰۹ در شکل (۶-الف) و (۶-ب) نشان داده شده‌است. مرز ذوب عاری از هر گونه عیب جوش کاری مانند حفره و ترک می‌باشد. به علاوه، دو لایه متفاوت در فصل مشترک فلز جوش الکتروود ۳۰۹ و فلز پایه فولاد X65 تشکیل شده‌است. لایه اول دارای فازی با شکل تیغه‌ای است که ضخامت آن در حدود ۳ میکرومتر است و در تماس با فولاد X65 می‌باشد. لایه دوم نیز با ضخامت تقریبی ۳ میکرومتر در تماس با فلز جوش است و توسط یک مرز سیاه‌رنگ از آن جدا شده‌است. به منظور شناسایی دقیق‌تر فازهای موجود در لایه‌های واسط، منحنی توزیع خطی عناصر آلیاژی که توسط آنالیز EDS اندازه‌گیری شده‌است، در شکل (۶-ب) نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که درصد عناصر آهن، کرم و نیکل در این دو لایه با یکدیگر متفاوت است. مقدار



شکل ۶ (الف) و (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فصل مشترک فلز جوش الکتروود ۳۰۹ و فولاد X65 در بزرگ‌نمایی‌های مختلف به همراه توزیع خطی عناصر آلیاژی در عرض این لایه، (ج) تصویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک فلز جوش و فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱، (د) حضور ذرات کاربید تیتانیوم و دلتا فریت در ناحیه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱

جدول ۶ ترکیب شیمیایی فازهای نشان داده شده در شکل (۶)

Mo	Ti	Mn	Si	Ni	Cr	Fe	ترکیب شیمیایی
۰/۱	۰/۱	۱/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۱	مابقی	فولاد X65
۰/۱	۰/۱	۰/۰	۰/۹	۹/۴	۱۹/۶	مابقی	فلز جوش
۰/۲	۰/۱	۰/۴	۰/۵	۳/۴	۱۰/۵	مابقی	لایه اول (فاز تیغه‌ای)
۰/۱	۰/۱	۰/۰	۰/۸	۷/۰	۱۷/۲	مابقی	لایه دوم

یکی از دلایل بالاتر بودن سختی، درصد بالاتر فاز دلتا فریت در ریزساختار فلز جوش حاصل از این الکتروود است که سبب افزایش فصل مشترک دو فاز فریت و آستنیت و افزایش سختی شده است. بالاتر بودن درصد عناصر آلیاژی در ترکیب فلز جوش حاصل از الکتروود ۳۰۹ نیز یکی دیگر از عوامل سختی بالاتر فلز جوش است. زیرا حضور عناصر در ترکیب فازهای آستنیت و فریت سبب افزایش استحکام و سختی این فازها با مکانیزم محلول جامد می‌شود.

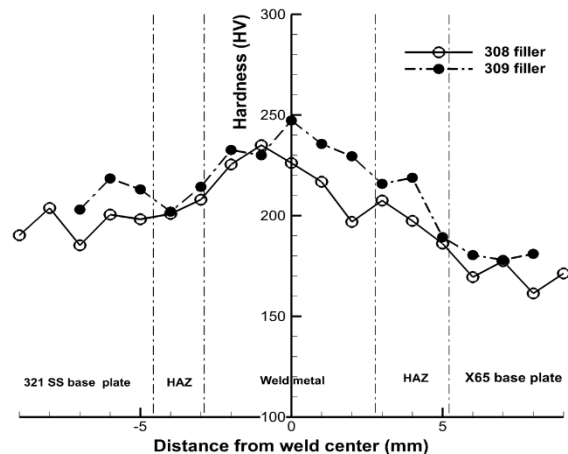
## خواص مکانیکی

### سختی

شکل (۷) منحنی تغییرات سختی در عرض جوش الکتروودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ را نشان می‌دهد. مقدار سختی فلز جوش دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ به ترتیب ۳۰ درصد و ۳۸ درصد بیشتر از فولاد کم‌آلیاژ است. علاوه بر این، مقدار میانگین سختی فلز جوش حاصل از الکتروود ۳۰۹ اندکی بالاتر از الکتروود ۳۰۸ می‌باشد.

استحکام فلز جوش شده است. از سوی دیگر، بالاتر بودن در صد عناصر آلیاژی محلول در ترکیب فازهای آستنیت و فریت در اتصال الکتروود ۳۰۹ می‌تواند سبب بهبود استحکام اتصال با مکانیسم محلول جامد شود. حضور این عوامل سبب شده است تا استحکام کششی فلز جوش با دو مکانیزم استحکام‌دهی محلول جامد و استحکام‌دهی مرز دانه‌ای افزایش یابد؛ اما باید توجه داشت که حضور فاز دلتا فریت در ریزساختار سبب کاهش چقرمگی جوش می‌شود [6]. از این رو، بالاتر بودن در صد فاز فریت در فلز جوش الکتروود ۳۰۹ سبب کاهش قابلیت تغییر طول آن شده است.

تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش برای هر دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ به ترتیب در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که علاوه بر حضور حفرات (Dimple) در سطح شکست که نشان‌دهنده مکانیزم شکست نرم و داکتیل است، سطوح صاف نیز در برخی از نواحی تشکیل شده‌اند. این نواحی بیانگر مکانیزم شکست ترد است و می‌تواند به دلیل رشد ترک‌ها در راستای فصل مشترک حاوی فاز مارتنزیت ایجاد شده باشد. البته شایان ذکر است که فصل مشترک فریت و آستنیت در فلز جوش نیز جزو نواحی مستعد به رشد ترک مطرح می‌باشد؛ اما، از آنجاکه شکست در هر دو اتصال در فصل مشترک فلز جوش و فولاد X۶۵ اتفاق افتاده است، از این رو به احتمال زیاد مکانیزم شکست ترد به دلیل حضور لایه واسط حاوی فاز مارتنزیت صورت گرفته است.



شکل ۷ منحنی تغییرات سختی برحسب فاصله در عرض جوش الکتروودهای ۳۰۸ و ۳۰۹

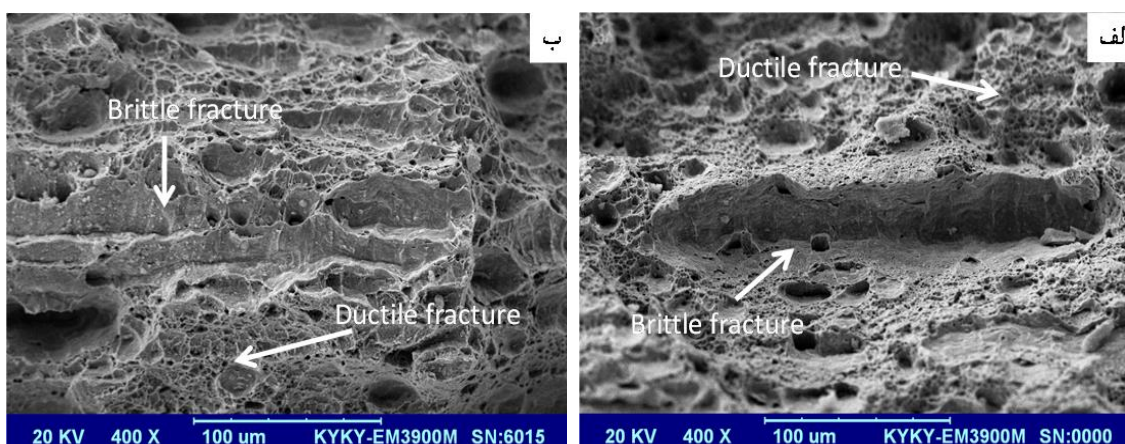
### خواص کششی

به منظور بررسی استحکام کششی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد X۶۵ که با استفاده از الکتروودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ جوش کاری شده‌اند، آزمون کشش انجام شد. اطلاعات حاصل از این آزمون به همراه خواص مکانیکی فلزات پایه و فلز جوش خالص در جدول (۷) ارائه شده است.

مقدار میانگین استحکام کششی جوش الکتروود ۳۰۹ بالاتر از جوش الکتروود ۳۰۸ است. اما، قابلیت تغییر طول در جوش الکتروود ۳۰۸ بیشتر است. بالاتر بودن استحکام کششی برای الکتروود ۳۰۹ به دلیل در صد بالاتر فاز فریت و در نتیجه بیشتر بودن فصل مشترک فریت-آستنیت است. به عبارت دیگر، افزایش فصل مشترک‌ها تعداد موانع در مقابل حرکت ناب به جایی‌ها را افزایش داده و منجر به افزایش

جدول ۷ خواص مکانیکی فلزات پایه و اتصالات جوش کاری شده با الکتروودهای ۳۰۸ و ۳۰۹

خواص مکانیکی			
قابلیت تغییر طول (درصد)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	
< ۴۰	< ۵۱۵	< ۲۰۵	فولاد ۳۲۱
۱۸	< ۵۳۰	< ۴۴۸	فولاد X۶۵
۴۵	۶۰۰	۴۳۰	الکتروود ۳۰۸H (سازنده)
۳۵	۵۸۰	۴۷۰	الکتروود ۳۰۹L (سازنده)
۲۵/۰±۵/۳	۱۰±۵۵۳	---	جوش الکتروود ۳۰۸
۱۸/۰±۷/۴	۲۱±۵۶۲	---	جوش الکتروود ۳۰۹



شکل ۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش برای (الف) الکتروود ۳۰۸ و (ب) الکتروود ۳۰۹

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال غیرهم‌جنس فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X65 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ با استفاده از فرایند جوش کاری قوسی دستی با دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ انجام شد. سپس ساختار، ریزساختار، سختی و خواص کششی اتصالات مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر مطرح کرد:

۱. ساختار هر دو اتصال در ناحیه جوش حاوی فازهای آستنیت و دلتا فریت بود. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که درصد فاز فریت در جوش الکتروود ۳۰۹ بالاتر (۱۳/۵ درصد حجمی) از مقدار این فاز در جوش الکتروود ۳۰۸ (۶/۵ درصد حجمی) بود. همچنین در هر دو اتصال یک لایه واسط حاوی فازهای فریت و مارتنزیت در فصل مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X65 تشکیل شد.

۲. مقدار سختی فلز جوش دو الکتروود ۳۰۸ و ۳۰۹ به ترتیب ۳۰ درصد و ۳۸ درصد بیشتر از فولاد کم‌آلیاژ بود. نتایج

آزمون کشش بیانگر آن بود که استحکام کششی جوش تولید شده با الکتروود ۳۰۹ در حدود ۱/۵ درصد بالاتر از الکتروود ۳۰۸ و مقدار قابلیت تغییر طول ۲۶ درصد کم‌تر بود. با توجه به این نتایج می‌توان از هر دو الکتروود برای اتصال غیرهم‌جنس فولادهای مذکور استفاده کرد؛ اما الکتروود ۳۰۸ به علت درصد بالاتر قابلیت تغییر طول و استحکام مشابه با الکتروود ۳۰۹ گزینه بهتری خواهد بود.

۳. شکست نهایی در تمامی نمونه‌ها در فصل مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ اتفاق افتاد. بررسی سطوح شکست نمونه‌ها بیانگر نوع شکست نرم و ترد در تمامی نمونه‌ها بود.

### تقدیر و تشکر

این پژوهش از حمایت مالی شرکت گاز استان سیستان و بلوچستان برخوردار بوده است و نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از این شرکت برای تهیه فولاد X65 و حمایت مالی صورت گرفته تشکر کنند.

### مراجع

۱. ناظم‌الرعایا، علیرضا، و فاضل‌نجم‌آبادی، محمود، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد API-X65 به روش جوش کاری هم‌زن اصطکاکی"، *فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، شماره ۹، صفحه ۷۵-۸۴، (۲۰۱۷).
۲. حیدری، معصومه، "اثر حرارت ورودی بر خواص مکانیکی و شکست جوش GMAW فولاد خط لوله در حضور هیدروژن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۹۵).

3. Sayyar, N., Shamanian, M. and Niroumand, B., "Arc Weldability of Incoloy 825 to AISI 321 Stainless Steel Welds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 262, pp. 562-570, (2018).
4. Kumar, P. and Sinha, A.N., "Effect of Pulse Width in Pulsed Nd:YAG Dissimilar Laser Welding of Austenitic Stainless Steel (304 L) and Carbon Steel (st37)", *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 5, pp. 317-334, (2018).
5. Poorkabirian, M., Mostaan, H. and Rafiei, M., "The Effect of Filler Metal on Properties of AISI 4130 to AISI 316L Dissimilar Joint", *Journal of Advanced Materials In Engineering*, Vol. 36, pp. 33-46, (2017).
6. Pouraliakbar, H., Hamed, M., Kokabi, A.H. and Nazari, A., "Designing of CK45 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Dissimilar Welds", *Materials Research*, Vol. 17, pp. 106-114, (2014).
7. Shojaati, M. and Beidokhti, B., "Characterization of AISI 304/AISI 409 Stainless Steel Joints Using Different Filler Materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 147, pp. 608-615, (2017).
8. شفیعیان، جواد، صائب نوری، احسان، و جعفرزادگان، مصطفی، "بررسی ارتباط ریزساختار و مقاومت به خوردگی جوش غیرهم جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و فولاد ساده کربنی st37 به روش جوش کاری اغتشاشی اصطکاکی"، *فصل‌نامه علوم و مهندسی خوردگی*، شماره ۸، صفحه ۷-۲۰، (۱۳۹۳).
9. مصطفائی، محمد علی، سرکاری خرمی، محمود، پور علی اکبر، حسام، و کوکی، امیر حسین، "بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهم جنس فولاد زنگ‌نزن فریتی به فولاد ساده کم کربن"، *چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسان متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران*، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (۱۳۸۹).
10. Gou, N.N., Zhang, J.X., Zhang, L.J., Li, Z.G. and Bi, Z.Y., "Single Pass Fiber Laser Butt Welding of Explosively Welded 2205/X65 Bimetallic Sheets and Study on the Properties of the Welded Joint", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 2539-2549, (2016).
11. Zhang, L., Pei, Q., Zhang, J.X., Bi, Z.Y. and Li, P.C., "Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Explosive Welded 2205/X65 Bimetallic Sheet", *Materials and Design*, Vol. 64, Article 462476, (2014).
12. Gou, N.N., Zhang, L.J. and Zhang, J.X., "Increased Quality and Welding Efficiency of Laser Butt Welding of 2205/X65 Bimetallic Sheets with a Lagging MIG Arc", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 251, pp. 83-92, (2018).
13. Sayiram, G. and Arivazhagan, N., "Microstructural Characterization of Dissimilar Welds between Incoloy 800H and 321 Austenitic Stainless Steel", *Materials Characterization*, Vol.102, pp. 180-188, (2015).
14. Sharma, S., Taiwade, R.V. and Vashishtha, H., "Investigation on the Multi-Pass Gas Tungstenarc Welded Bi-Metallic Combination between Nickel-Based Superalloy and Ti-Stabilized Austenitic Stainless Steel", *Journal of Materials Research*, Vol. 32, pp. 3055-3065, (2017).
15. www.yazd-electrode.com, (Acsessed 2021).
16. Folkhard, E., "Welding Metallurgy of Austenitic Stainless Steels", Springer., Vienna, pp. 197-222, (1988).
17. Feng, Y., Luo, Z., Liu, Z., Li, Y., Luo, Y. and Huang, Y., "Keyhole Gas Tungsten arc Welding of AISI 316L Stainless Steel", *Materials & Design*, Vol. 85, pp. 24-31, (2015).

## Investigation of microstructure and mechanical properties of dissimilar joints between AISI 321 stainless steel and X65 high-strength low-alloy steel

Mahmood Sharifitabar<sup>1</sup> Sahar Khajeh Mahmodi<sup>2</sup>

### 1. Introduction

The chemical compositions of high strength low-alloy steels (HSLA) and stainless steels are completely different. So, controlling the reactions at their dissimilar joint interface and evaluation of microstructure and mechanical properties of the joints has a great importance from technical point of view. API 5L-X65 micro alloy steel is used to make oil and gas transportation pipelines thanks to its outstanding high strength. This alloy has a ferritic-pearlitic microstructure and the presence of minor constituents of Ti, Al, Nb, and V in its composition results in the transformation of austenite to fine-grained ferrite. On the other hand, 321 stainless steel belongs to the austenitic stainless steel group. The addition of small concentration of Ti to the composition leads to the stabilization of carbon and eliminates the grain boundary corrosion at high temperatures between 550 and 790 °C. The dissimilar joining of these steels will be a solution to overcome some limitations in selection of engineering materials in chemical, petrochemical, oil and gas, industries.

### 2. Materials and methods

In order to join 321 stainless steel to X65 HSLA steel, plates with the dimensions of 12×100×300 mm<sup>3</sup> were cut. Then they were cleaned and joined together by shielded metal arc welding process using E308H and E309L stainless steel electrodes with 4 mm diameter as the filler materials. Finally, optical emission spectroscopy, X-ray diffraction analysis, optical microscope, scanning electron microscope equipped with energy dispersive analysis and hardness and tensile tests were employed to characterize the welded joints.

### 3. Results and discussion

X-ray diffraction patterns of weld metals extracted from dissimilar joints between X65 HSLA steel and 321 stainless steel made by 308 and 309 electrodes are shown in Fig. 1. Austenite and ferrite were identified in the structure of both joints. However, the peak intensity of delta ferrite is higher for 309 electrode weld metal that indicated the higher volume fraction of this phase in the microstructure of the joint.

The micrographs of 308 and 309 weld metals in

the last welding pass are illustrated in Fig. 2(a) and (b), respectively. A dark gray phase with worm-like and layer morphologies was distributed in the light gray matrix as shown in Fig. 2(a). Fig. 2(b) shows that this phase has a skeletal morphology in the case of 309 electrode weld metal. Moreover, the volume fraction of this phase was considerably higher. The EDS results confirmed that the concentration of Cr was higher in the dark gray phase than the matrix. Since Cr is a ferrite stabilizer element, it was concluded that the dark gray phase was ferrite distributed in the austenite matrix. Figs. 2(c) and (d) show that reheating significantly altered the morphology and the volume fraction of delta ferrite in the weld microstructure.

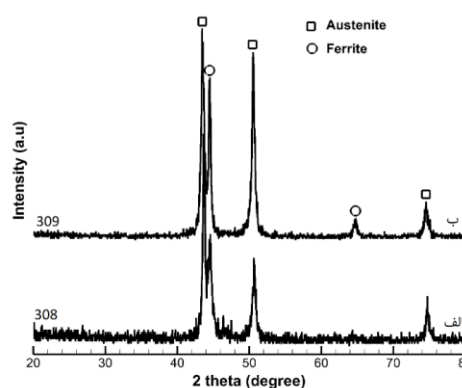


Figure 1 X-ray diffraction patterns of dissimilar joints between X65 HSLA steel and 321 stainless steel welded with 308 and 309 electrodes.

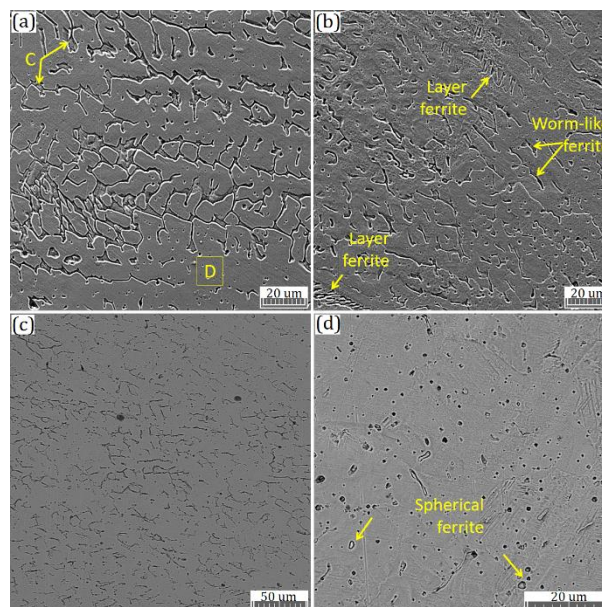
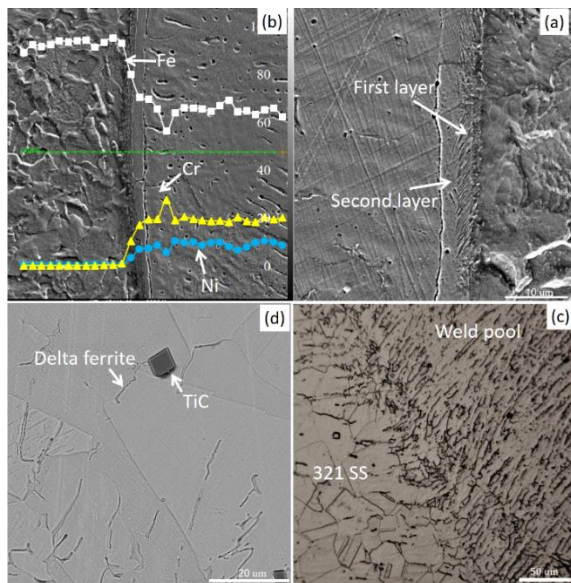


Figure 2 Different morphologies of ferrite at the microstructure of the joints for the last pass and the reheated region made by (a) and (c) 309 electrode and (b) and (d) 308 electrode.

<sup>1</sup> Corresponding Author, Associate Professor, Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan . Email: msharifitabar@eng.usb.ac.ir

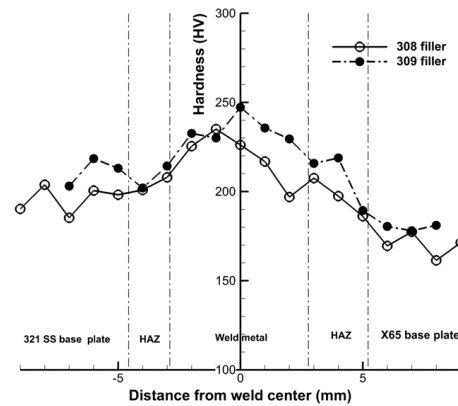
<sup>2</sup> M.Sc. Department of Materials Engineering, University of Sistan and Baluchestan

The interfaces between 309 electrode weld metal with both X65 HSLA steel and 321 stainless steel are shown in Fig. 3. An interface layer was detected between the weld metal and X65 steel as shown in Fig. 3(a). The distribution of alloying elements across the interface is shown in Fig. 3(b). Putting the composition of the interface layer on the Schaeffer diagram proposed the formation of martensite phase in this layer. On the other side, the interface between the weld metal and 321 stainless steel was free from any defect in Fig. 3(c) and the TiC particles were detected at the heat affected zone of stainless steel as illustrated in Fig. 3(d).



**Figure. 3** Micrograph of the joint interface (a) between 309 weld metal and HSLA steel, (b) distribution of elements across the interface, (c) joint interface between 321 stainless steel and 309 weld metal, and (d) heat affected zone of 321 stainless steel.

The distribution of hardness across the welded joints are shown in Fig. 3. The weld metal hardness values for 308 and 309 electrodes were respectively 30% and 38 % higher than the HSLA steel. Moreover, the mean hardness of 309 electrode weld metal was slightly higher than the 308 electrode weld metal.



**Figure. 3** Distribution of hardness across the dissimilar joints between X65 HSLA steel and 321 stainless steel made by 308 and 309 electrodes.

Tensile test results showed that the strength of the joint set up using 309 electrode reached 562 MPa that was 1.5% higher and its maximum elongation was 18.7% that was 26% lower than the joint made by 308 electrode. In all specimens fracture occurred at the interface between the weld metal and the low alloy steel. A mixed ductile-brittle failure mode was observed on the fracture surface of tensile test specimens.

#### 4. Conclusion

In the present study, dissimilar joints were established between X65 HSLA steel and 321 stainless steel by shielded metal arc welding. 308 and 309 stainless steel electrodes were selected as the filler materials. Then, structure, microstructure and mechanical properties of the joints were investigated. Results showed that the formation of higher delta ferrite content in the 309 electrode weld metal increased its strength, while decreased elongation considerably. Meanwhile, the formation of a martensitic interlayer at the weld metal/HSLA steel interface concentrated the fracture to this region. Finally, 308 electrode was proposed as the proper electrode to joint these materials.