

# بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر مشابه فولاد زنگ نزن AISI304L به فولاد ASTM514 به روش جوشکاری قوس تنگستن تحت گاز محافظ

موسی توکلی<sup>۱\*</sup>، عباس سعادت<sup>۲</sup>، محمدرضا خانزاده قره شیران<sup>۳</sup>

۱- مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقاتی مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، اصفهان، ایران

۳- مرکز تحقیقاتی مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، اصفهان، ایران

\*mousa.tavakoli@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۹)

## چکیده

در این پژوهش، ریز ساختار و خواص مکانیکی جوش‌های غیر مشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L به فولاد کوئنچ و تمپر شده ASTM514 مورد بررسی گرفته است. بدین منظور، روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز با استفاده از دو نوع فلز پرکننده ER309L و ERNiCr-3 استفاده شده است. پس از جوشکاری، ریز ساختار مناطق مختلف هر اتصال شامل فلزات جوش، مناطق متأثر از حرارت، فصل مشترک‌ها و مناطق مخلوط نشده، با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی (EDS) مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. فلز پرکننده ERNiCr-3 ریز ساختار کاملاً آستنیتی ایجاد نموده و ریز ساختار فلز جوش ER309L به صورت فریت اولیه همراه با مقداری آستنیت در پایان انجام داده شده است. همچنین، خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه، سختی و نیز شکست‌نگاری نمونه‌ها بررسی شده است. در آزمایش کشش تمامی نمونه‌ها از منطقه متأثر از حرارت فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و به صورت نرم دچار شکست شده است. میانگین استحکام کششی در فلز جوش ER309L، ۵۵۶MPa و در فلز جوش ERNiCr-3 دارای استحکام کششی ۵۹۳MPa، افزایش پیدا کرده است. میزان انرژی جذب شده در اتصال ایجاد شده، فلز پرکننده ERNiCr-3 به طور میانگین ۱۱۷ ژول و با فلز پرکننده ER309L، ۹۵ ژول شده است. فلز جوش ERNiCr-3 بیشترین سختی، ۱۵۶ ویکرز را دارا بوده، در حالی که فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی ER309L، ۱۲۷ ویکرز کمترین مقدار را دارا بود. می‌توان نتیجه گرفت برای اتصال بین فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304L به فولاد کوئنچ و تمپر شده ASTM514، ماده پرکننده ERNiCr-3 ویژگی‌های بهتری از لحاظ خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه و سختی سنجی ارائه داده است.

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری غیرمشابه، فولاد زنگ نزن آستنیتی، فولاد کوئنچ تمپر شده و ریز ساختار.

## ۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی 304L به عنوان یکی از پر مصرف ترین گروه فولادهای زنگ نزن بشمار می‌روند که به گونه گسترده در کاربردهایی که نیاز به مقاومت به خوردگی خوب در اتمسفر و یا دمای بالا باشد، به کار گرفته می‌شود. این فولاد

است. در این راستا تحقیقات متعددی در مورد فولادهای کوئنچ تمپر شده انجام گرفته است که برای نمونه می‌توان به تحقیقات شایان‌فر و همکارانش اشاره کرد که موفق شدند با استفاده روش تنگستن گاز پالسی، دانه‌های منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش فولاد کوئنچ - تمپر A517 را ریز دانه نماید [۲]. همچنین حاجیان و همکارانش با اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304L به فولاد ساده کربنی ASTM A335 با استفاده از دو فلز پرکننده ER309L و ERNiCr-3 به بررسی ساختار و خواص مکانیکی پرداخته‌اند. این پژوهشگر گزارش کرده است که در این اتصال نامشابه، فلز پرکننده ERNiCr-3 ریز ساختار کاملاً آستنیتی و فلز پرکننده ER309L، ۵/۵ درصد فریت با نمودار شیفلر دست آمده است. این پژوهشگر نیز نتیجه گرفته است که برای این اتصال فلز پرکننده ERNiCr-3 ویژگی‌های بهتری نسبت به ER309L دارد [۳]. در این تحقیق اتصال فولاد A514 به فولاد 304L به روش جوشکاری قوسی تنگستی و با استفاده از دو فیلر ER309L و ERNiCr-3 انجام شد. ساختار قطعات با میکروسکوپ نوری و مقاومت به ضربه مناطق جوشکاری شده بررسی شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

جهت انجام آزمایش از ورق‌هایی از جنس فولاد A514 و فولاد 304L با ابعاد  $(400 \times 150 \times 6)$  mm استفاده شده است. برای جوشکاری از دو فلز پرکننده ER309L و ERNiCr-3 استفاده شده است [۷]. آنالیز شیمیایی قطعات فولادی و سیم جوش‌های مصرفی در جدول (۱) نشان داده شده است. در تمامی موارد از مفتول‌هایی با قطر  $2/4$  میلیمتر جهت پاسه ریشه و پاس‌های بعدی استفاده شد. جهت اتصال لب به لب با شیار V شکل بر اساس استاندارد AWS D1.1 لبه سازی شد. فرآیند جوشکاری با استفاده از روش جوشکاری قوس - الکتروود تنگستن با گاز محافظ با قطبیت منفی الکتروود (GTAW-DCEN) در وضعیت 1G و در چهار پاس (یک پاس نفوذی، دو پاس پرکننده و یک پاس نما) جوشکاری شدند. جوشکاری با دستگاه گام الکترونیک

در صنایع گوناگون نظیر نفت و گاز، پالایشگاه، پتروشیمی و نیروگاه‌های تولید برق کاربرد فراوان دارد [۱]. فولادهای زنگ نزن آستنیتی 304L به دلیل داشتن مقادیر بالایی از عناصر آلیاژی همچون کروم و نیکل و مقادیر جزئی کربن در ترکیب شیمیایی در کاربردهای که حمله بین دانه‌ای و ترک خوردن خوردگی تنشی مورد توجه است، بکار می‌رود. مقاومت اکسیداسیون در دمای بالا به خاطر میزان کروم در این فولاد می‌باشد. وجود نیکل که عنصری آستنیت‌زا می‌باشد، باعث بالا رفتن خواص مقاوم به حرارت این آلیاژ می‌شود [۱-۲]. با وجود مقاومت به خوردگی خوب فولادهای زنگ نزن آستنیتی، در محیط‌های بسیار خورنده حاوی غلظت‌های بالا یون کلر این فولادها مقاوم نبوده و در برابر خوردگی حفره‌ای و ترک خوردن خوردگی تنشی آسیب پذیرند زیرا این فولادها در محدوده ۸ تا ۱۲ درصد وزنی نیکل، کم‌ترین مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی را از خود نشان می‌دهند و با افزایش و یا کاهش میزان نیکل مقاومت در خارج از این محدوده افزایش می‌یابد [۱-۲]. از سوی دیگر فولاد کوئنچ تمپر شده ASTM A514 نیز یکی از مهمترین فولاد عرصه صنعتی می‌باشد و کاربرد وسیعی در ساخت تجهیزات و شناورها دارد. با توجه به مارتزیتی بودن این نوع فولادها و تغییر ساختار منطقه متأثر از حرارت به فریت و پرلیت، استحکام منطقه متأثر از حرارت نسبت به فلز پایه کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه فولادهای کوئنچ تمپر شده حساسیت بالایی نسبت به حرارت ورودی دارند. به همین دلیل حرارت ورودی زیاد، نرخ سرد شدن را کاهش داده و ریز ساختار و خواص نامطلوبی ایجاد می‌کند. بنابراین از فرآیندهای با حرارت ورودی زیاد باید خودداری کرد و از روش‌هایی استفاده شود که کمترین میزان حرارت ورودی داشته باشد. لذا با توجه به موارد یاد شده می‌بایست در جوشکاری این نوع فولادها از روش‌هایی استفاده کرد که حرارت ورودی کم داشته باشد تا از این طریق بتوان خسارت ناشی از تغییر ساختار در مناطق مجاور حوضچه جوش و متأثر از حرارت را به حداقل رساند. به همین دلیل ریز دانه کردن مناطق متأثر از حرارت این نوع فولادها از اهمیت خاصی برخوردار

ثانیه اچ الکتروشمیایی انجام شده است. به منظور بررسی ریز ساختار مناطق مختلف جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری با مارک (Olympus) مدل CK40M در بزرگنمایی مختلف، دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مدل این دستگاه Leo\_VP435 مورد بررسی، تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بزرگنمایی این دستگاه حداکثر ۵۰۰۰۰ برابر بوده و حداکثر ولتاژ آن ۳۰kV می باشد. آنالیز عنصری توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی از نوع Zeiss، مدل Vo ساخت کشور آلمان با ولتاژ ۲۳ کیلو ولت انجام شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، آزمون‌های خمش توسط دستگاه Senze مدل ۲۶۶ با زاویه ۱۸۰ درجه تحت تست خمش قرار گرفت. آزمون‌های کشش توسط دستگاه SANTAN مدل STM400 انجام شد. برای انجام آزمایش ضربه از دستگاه تست ضربه با نام Amesler مدل pkp300 ساخت کشور آلمان استفاده شد. آزمون‌های میکروسختی سنجی توسط دستگاه AFFRI ساخت کشور ایتالیا مدل DM8B انجام شد.

مدل Pars-EL631 بصورت دستی انجام شد. الکتروود مصرف نشدنی مورد استفاده، الکتروود تنگستنی ۲٪ اکسید توریم به قطر ۲/۴ میلی متر بود. دمای بین پاسی ۱۲۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد تا تنش‌های ناشی از انقباض و سرد شدن فلز جوش به حداقل مقدار ممکن برسد. پس از جوشکاری در دمای ۲۹۰ درجه سانتیگراد جهت انحلال جزئی فازهای ترد به مدت ۱۰ دقیقه عملیات پسگرم روی آنها انجام شد. مشخصات پارامترهای جوشکاری و حرارت ورودی در جدول (۲) ارائه شده است. بعد از عملیات پسگرم از هر فلز جوش یک نمونه به ابعاد (۱۵×۳۰) جهت انجام آزمایش متالوگرافی از قطعات تهیه شد. سطوح مورد نظر به وسیله سنباده‌های کاربرد سیلیسیوم ۸۰ تا ۲۰۰۰ صاف شده و سپس پولیش نهایی به همراه پودر آلومینا انجام شد. بعد از انجام پولیش نمونه‌های متالوگرافی، قطعات فولاد A514 توسط محلول نایتال ۲٪ اچ شدند و بعد از عکس برداری از این مناطق، مرحله دوم اچ یعنی فولاد زنگ نزن 304L و فلز جوش توسط محلول اسید اگزالیک با ولتاژ ۵ ولت به مدت ۴۵ تا ۵۰

جدول (۱): آنالیز شیمیایی قطعات فولادی و سیم جوش‌های مصرفی (بر حسب درصد وزنی)

عناصر مواد مصرفی	Fe	Mo	Ni	Cr	Mn	Si
A514	پایه	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۵۷	۰/۹۱	۰/۳
304L	پایه	۱/۲۲	۱۰/۱	۱۸/۷۱	۱/۶۴	۰/۲۲
ER309L	پایه	۰/۳	۱۳/۲	۲۴/۲	۱/۸۸	۰/۳۷
ERNiCr-3	۳	۳	پایه	۱۶/۵۶	۰/۵	۰/۷۵

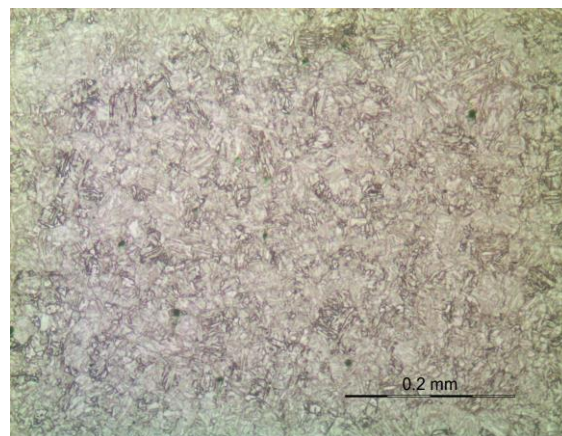
جدول (۲): مشخصات پارامترهای جوشکاری و حرارت ورودی

فلز پرکننده	شماره پاس	شدت جریان (آمپر)	سرعت جوشکاری (mm/s)	میانگین حرارت ورودی (Kj/mm)
ER309L	۱	۱۵۰	۱/۰۸	۳/۳۷۰
	۲	۱۴۰	۱/۱	
	۳	۱۳۰	۱/۲	
	۴	۱۲۰	۱/۲	
ERNiCr-3	۱	۱۵۰	۱/۰۷	۳/۲۹۹
	۲	۱۴۰	۱/۱	
	۳	۱۴۰	۱/۱	
	۴	۱۲۵	۱/۲	

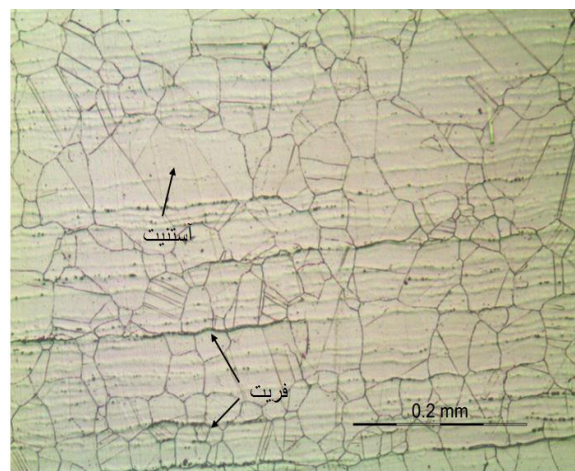
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی‌های ریز ساختاری فلزات پایه

در شکل (۱) ریز ساختار فلز پایه A514 را نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده ساختار فولاد مارتزیتی است. در شکل (۲) ریز ساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L را نشان داده شده است. همانطور که مشخص شده ریز ساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L دارای زمینه کاملاً آستنیتی است. با این حال همواره مقدار کمی فاز فریت دلتا نیز در ساختار وجود دارد. فریت موجود در مرز دانه در اثر جدایش عناصر فریت زا به ویژه کروم در طی انجماد ناشی شده است. مقدار این فریت معمولاً کمتر از ۵ تا ۶ درصد است.



شکل (۱): ریز ساختار فلز پایه A514



شکل (۲): ریز ساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304 L

#### ۳-۲- مقایسه ریز ساختار فلز جوش

در این تحقیق از فلز پرکننده از نوع فولاد زنگ نزن آستنیتی 309L استفاده شد. به طور کلی نوع انجماد در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به عواملی همچون ترکیب شیمیایی و فاکتورهای سینتیکی مانند سرعت سرد شدن بستگی خواهد داشت [۱-۲]. مهم ترین عامل مقدار کروم و نیکل معادل و نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  در ترکیب شیمیایی است که مقادیر مربوط به این فلز جوش در جدول (۳) نشان داده شده است. هر چه نسبت کروم معادل به نیکل معادل در آلیاژ بیشتر باشد احتمال تشکیل فریت بیشتر خواهد بود [۱، ۲ و ۹].

جدول (۳): مقادیر محاسبه شده کروم و نیکل معادل در حالت رقیق شده برای

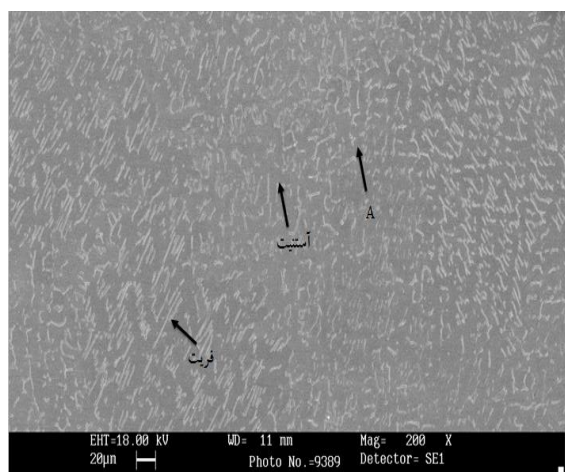
فلز پرکننده 309L

$Cr_{eq}/Ni_{eq}$	$Ni_{eq}$	$Cr_{eq}$
۱/۶۶	۱۵/۰۵	۲۵/۰۵

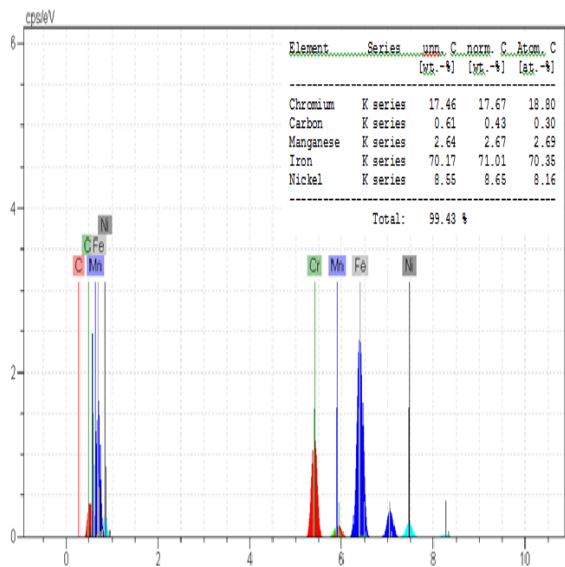
بررسی مراجع نشان داده است، هنگامی که نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  کمتر از ۱/۲ باشد و انجماد به صورت تعادلی باشد ساختار به صورت آستنیتی بوده و فریت در ساختار موجود نیست، که نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  حدود ۱/۶۶ محاسبه شده است. در این آلیاژ که مقدار فریت کنترل شده و یا عناصر آستنیت زا بیشتری در ترکیب وجود دارد، احتمال تشکیل آستنیت اولیه و قرار گرفتن آن در مرکز جوش، رو بر افزایش خواهد بود، البته با افزایش سرعت انجماد، این اتفاق کمتر حادث خواهد شد. فریت دلتا در ریز ساختار جوش بسته به نوع انجماد می‌تواند فریت اسکلتی (کرمی)، شبکه‌ای یا سوزنی باشد، در هنگامی که سرعت سرد شدن جوش متوسط است و یا وقتی  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  کم باشد فریت اسکلتی ایجاد می‌شود. در اینجا نیز شرایط بدین گونه بوده است. شکل‌های (۳) و (۴) تصویر میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی ریز ساختار فلز جوش 309L را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در جوش با فلز پرکننده 309L هیچ‌گونه ترکی وجود ندارد. وجود حداقل مقدار فریت در ساختار جوش نشان می‌دهد که ناحیه جوش در برابر ترک انجمادی مقاوم



شکل (۳): تصویر میکروسکوپ نوری، ریز ساختار فلز جوش 309L



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ریز ساختار فلز جوش 309L



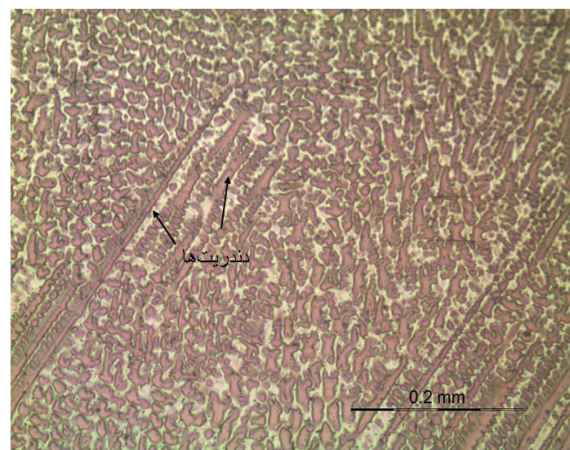
شکل (۵): نتایج آنالیز عنصری فلز جوش 309L

است. سیم جوش ERNiCr-3 دیگر فلز پرکننده استفاده شده برای اتصال غیر مشابه در این تحقیق بود. بر خلاف فلز پرکننده قبلی که پایه آهن بود، این فلز پرکننده پایه نیکل می‌باشد. فلز پرکننده ERNiCr-3 برای جوشکاری آلیاژهای Fe-Ni-Cr به یکدیگر و به فلزات مشابه در سرویس های کاربردی با درجه حرارت بالا و صنایع اتمی فلز پرکننده ERNiCr-3 کاربرد دارد [۲ و ۱۰]. شکل (۵) آنالیز عنصری منطقه فلز جوش 309L را نشان می‌دهد. این آنالیز در فلز جوش در نقطه A مشخص شده در شکل (۴) گرفته شده است. نتایج آنالیز عنصری نشان می‌دهد، بیشترین مقدار عناصر موجود در فلز جوش را آهن، کروم و نیکل تشکیل می‌دهد. شکل های (۶) و (۷) ریز ساختار میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی منطقه جوش فلز پرکننده ERNiCr-3 را نشان می‌دهد، سیم جوش مصرفی دارای مقدار زیاد نیکل، دارای ساختار بلور مکعبی با وجه مرکز دار می‌باشد. همانطور که انتظار می رود، ریز ساختار مطابق انتظار کاملاً آستنیتی بوده و از دانه‌هایی تشکیل شده است که تقریباً هم محور هستند. این حالت انجماد به صورت آستنیت تک فاز نوع (A) بوده، که به خاطر انجماد رخ داده است. در درون دانه‌ها ساختار دندریتی سلول، ساختار غالب است. در این قسمت بازوهای دندریتی تا حدودی مشخص بوده و مناطق بین دندریتی با رنگ روشن متمایز است. هر چند که دندریت های هم محور هم در برخی از دانه‌ها وجود دارند. جهت گیری رشد دندریت‌ها در هر دانه متفاوت است و در واقع یک نوع رشد رقابتی در بین دانه‌های مختلف وجود دارد [۲، ۴ و ۸]. شکل (۸) آنالیز نقطه ای بین دندریتی فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد. این آنالیز در فلز جوش در نقطه A مشخص شده در شکل (۷) گرفته شده است. نتایج نشان داده، بیشترین مقدار عناصر موجود در فلز جوش را نیکل، کروم و آهن تشکیل داده است.



### ۳-۳- بررسی ریز ساختار فصل مشترک فلزات پرکننده و فلزات پایه

شکل‌های (۹) و (۱۰) تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و فلز جوش 309L را نشان می‌دهد. پدیده بارزی که در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L مشاهده می‌شود، تشکیل مقدار فریت دلتا است. فریت دلتا به صورت اسکلتی انجماد یافته است که مورفولوژی آن به وضوح مشخص می‌باشد. ماهیت منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به ترکیب شیمیایی و ریز ساختار فلز پایه بستگی دارد. مشخص شده است، که هر چه نسبت کروم معادل به نیکل معادل در آلیاژ بیشتر باشد، احتمال تشکیل فریت بیشتر خواهد شد، که در این آلیاژ کروم معادل به نیکل معادل حدود ۱/۶ می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، میزان تشکیل فریت در منطقه متأثر از حرارت معمولاً کم است، چون استحاله آستنیت به فریت نسبتاً آهسته است و سرعت سرد شدن در منطقه متأثر از حرارت زیاد می‌باشد. فریت، در طول مرز دانه‌ها تشکیل شده است. فریت تشکیل شده در مرز دانه‌های HAZ، رشد دانه‌ها را محدود کرده و احتمال ترک خوردن ذوبی HAZ را کاهش داده است. با انتخاب فلز جوش 309L که دارای پتانسیل فریت بالاتر از یک، است، ترک خوردن ذوبی، مخصوصاً در فلز پایه حاضر که احتمال جدایش ناخالصی‌ها در مرز دانه‌ها در دمای بالا، انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد، زیرا در طول مرزهای HAZ، وجود مقداری فریت می‌تواند به طوری موثری حساسیت به ترک خوردن ذوبی را کاهش دهد. این نوع ترک خوردن می‌تواند با کنترل ترکیب فلز پایه کنترل شود. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، فصل مشترک فولاد کونچ تمپر A514 و فلز جوش 309L را نشان می‌دهد، در این تصاویر می‌توان مشاهده کرد نوع انجماد از نوع دندریتی می‌باشد. دلیل این امر این است که به علت همسایگی فلز جوش با فولاد A514 که انتقال حرارت بالاتری نسبت به فولاد 304L دارد، نسبت G/R به میزان کافی

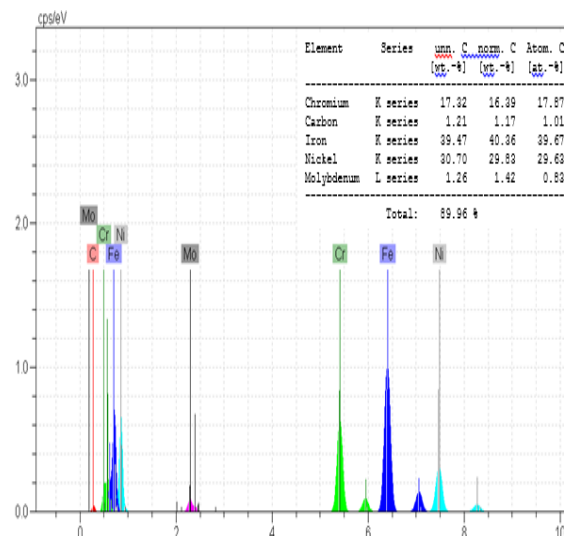


شکل (۶): تصویر میکروسکوپ نوری، ریز ساختار فلز جوش ERNiCr-3

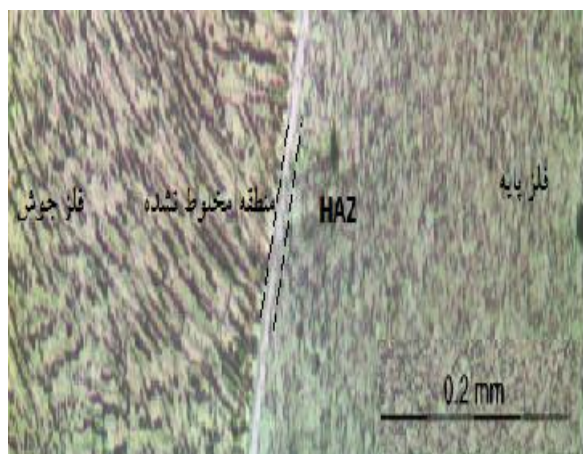


شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی ساختار منطقه جوش فلز پرکننده

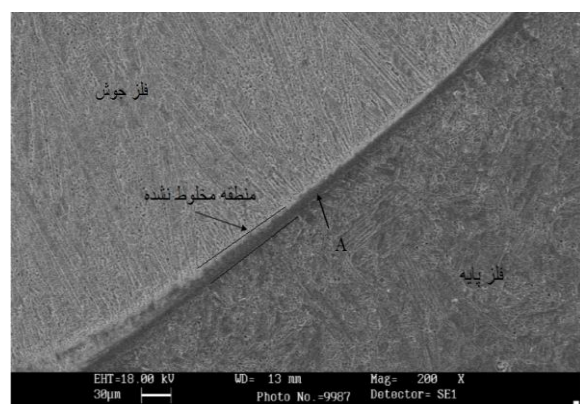
ERNiCr-3



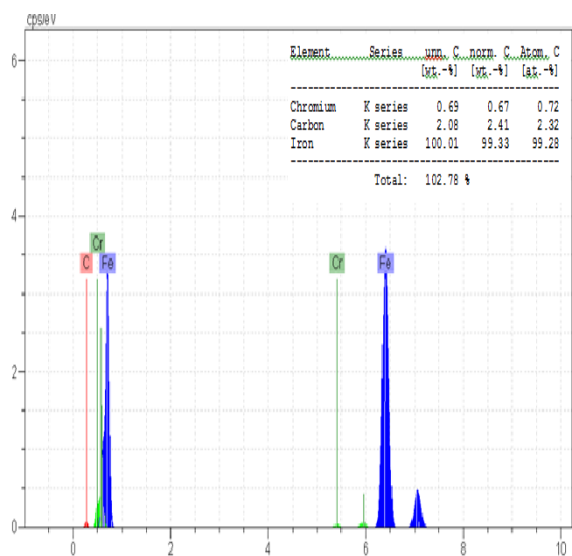
شکل (۸): آنالیز نقطه ای بین دندریتی فلز جوش ERNiCr-3



شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپ نوری، فصل مشترک فلز پایه AISI 514 و فلز جوش 309L

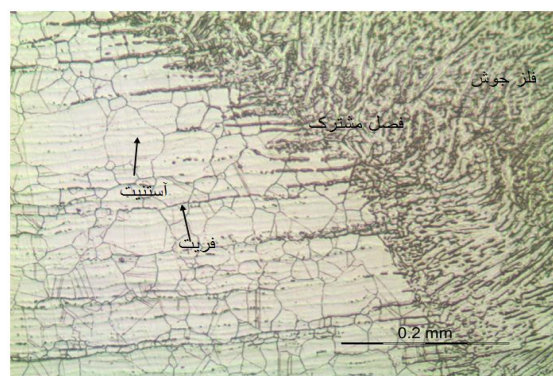


شکل (۱۲): تصویر الکترونی روبشی، ناحیه باریک در فصل مشترک فولاد کونچ تمپر شده AISI 514 و فلز جوش 309L

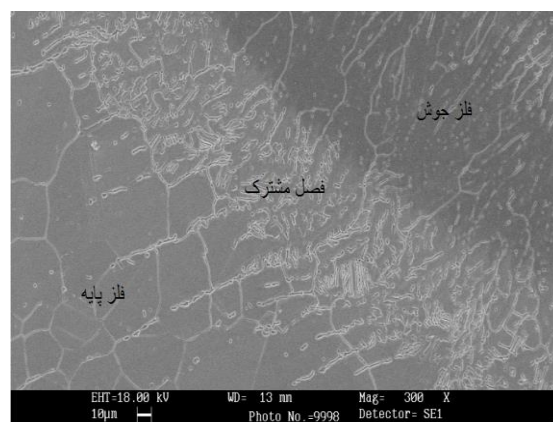


شکل (۱۳): نتایج آنالیز عنصری منطقه مخلوط نشده در مرز ذوب فلز پایه فولاد کونچ تمپر شده AISI 514 و فلز جوش 309L

کاهش یافته به طوری که انجماد فلز جوش از نوع دندریتی است. در داخل این ناحیه‌ها ریز ساختار ممکن است هم از فلز جوش و هم HAZ به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت باشد و در معرض گرادیان‌های ترکیبی موضعی و اثرات نفوذی قرار گیرد. فلز پایه A514 دارای محتوای کربن بالاتری نسبت به فلز جوش 309L می‌باشد. بنابراین در طی جوشکاری احتمال مهاجرت کربن از HAZ به ناحیه ذوب وجود خواهد داشت [۱-۳]. شکل (۱۳) نتایج آنالیز عنصری ناحیه باریک در فصل مشترک فولاد کونچ و تمپر شده AISI 514 و فلز جوش 309L را ارائه می‌دهد. این آنالیز در نقطه A مشخص شده در شکل (۱۲) گرفته شده است. انتخاب این نقطه جهت آزمایش آنالیز عنصری به این دلیل بود که معمولاً بیشترین میزان رقت در کنار مرز جوش می‌باشد و در این محل تغییر غلظت عناصر به خوبی نشان داده است [۳].



شکل (۹): تصویر میکروسکوپ نوری، فصل مشترک فلز پایه 304L و فلز جوش 309L



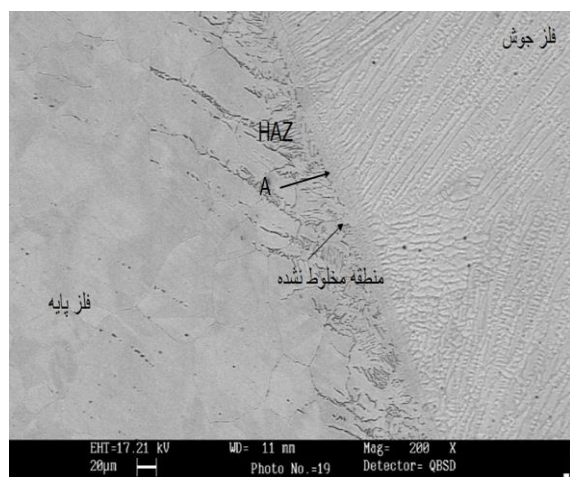
شکل (۱۰): تصویر میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک فلز پایه 304L و فلز جوش 309L



کم در این تحقیق نسبت داد. شکل (۱۹) نتایج آنالیز عنصری منطقه مخلوط نشده در مرز ذوب فلز پایه فلز پایه A514 و فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد. این آنالیز در کنار مرز ذوب در نقطه A مشخص شده در شکل (۱۸) گرفته شده است. انتخاب این نقطه جهت آزمایش آنالیز عنصری به این دلیل بود که معمولاً بیشترین میزان رقت در کنار مرز جوش می‌باشد و در این محل می‌توان تغییر غلظت را به خوبی نشان داد [۳]. بررسی‌ها نشان داد که این منطقه دارای ترکیب شیمیایی مشابه با فلز پایه فولاد کوئنچ و تمپر شده A514 می‌باشد.



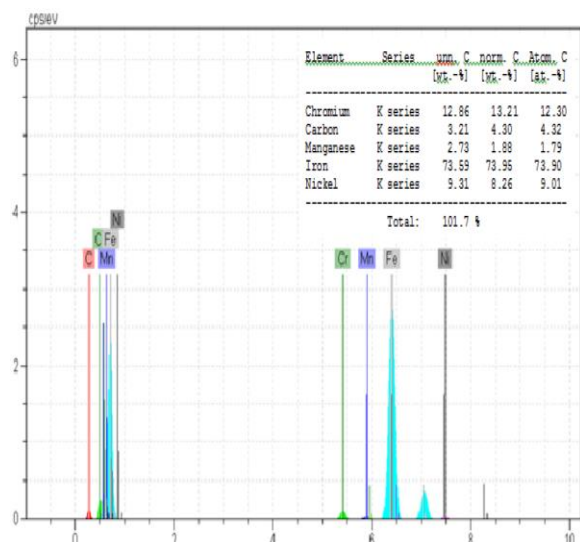
شکل (۱۴): تصویر میکروسکوپ نوری، فصل مشترک فلز پایه 304L و فلز جوش ERNiCr-3



شکل (۱۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، فصل مشترک فلز 304L و فلز جوش ERNiCr-3

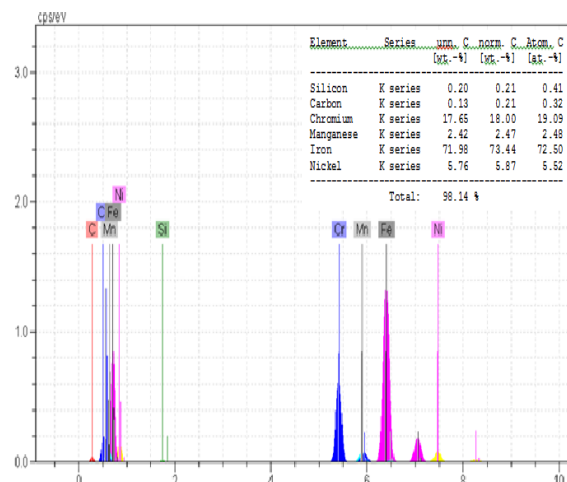
شکل‌های (۱۴) و (۱۵) تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، فصل مشترک فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L و فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد، یک فصل مشترک کاملاً پیوسته در سرتاسر مرز جوش مشاهده می‌شود. در حد فاصل بین فلز پایه و فلز جوش یک منطقه مخلوط نشده (UMZ) وجود دارد. علت این پدیده این است که بخشی از فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L که در مجاورت حوضچه وجود دارد، ذوب گردیده، ولی بدون اینکه با فلز جوش مخلوط شود دوباره منجمد می‌شود، بنابراین ممکن است این منطقه ترکیب شیمیایی فلز پایه را دارا باشد. در واقع جریان موضعی سیال برای مخلوط شدن به اندازه کافی قوی نبوده است، ولی برای حرکت دادن قسمت‌هایی از فلز پایه ذوب شده کافی بوده است. حاجیان و همکارانش نشان دادند، منطقه ترکیب نشده به عنوان لایه نازک وجود دارد که آن قسمت کوچکتر از فلز پایه به طور کامل ذوب شده و بدون رقیق سازی فلز پرکننده دوباره منجمد شده است [۳]. شکل (۱۶) نتایج آنالیز عنصری منطقه مخلوط نشده در مرز ذوب فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L و فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد. این آنالیز در کنار مرز ذوب در نقطه A مشخص شده در شکل (۱۵) گرفته شده است. آنالیز عنصری برای منطقه مخلوط شده انجام شد، بررسی‌ها نشان داد که این منطقه دارای ترکیب شیمیایی مشابه با فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L می‌باشد. شکل (۱۷) و (۱۸) تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، فصل مشترک فلز پایه فولاد کوئنچ تمپر A514 و فلز جوش ERNiCr-3 را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشخص است، در منطقه متأثر از حرارت ساختار مارتزیت فلز پایه در کنار مرز جوش به فریت و پرلیت تبدیل شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود منطقه ذوب جزئی و منطقه مخلوط نشده در این قسمت از اتصال، از عرض چندانی برخوردار نیست. چنانچه حوضچه مذاب مدت بیشتری در منطقه دمای بالا بماند و درجه سرد شدن آهسته تری داشته باشد، فرصت برای رشد دانه‌ها ایجاد خواهد شد، که این پدیده را می‌توان به سرعت پایین جوشکاری و حرارت ورودی





شکل (۱۹): نتایج آنالیز عنصری منطقه مخلوط نشده در مرز ذوب فلز پایه

A514 و فلز جوش ERNiCr-3

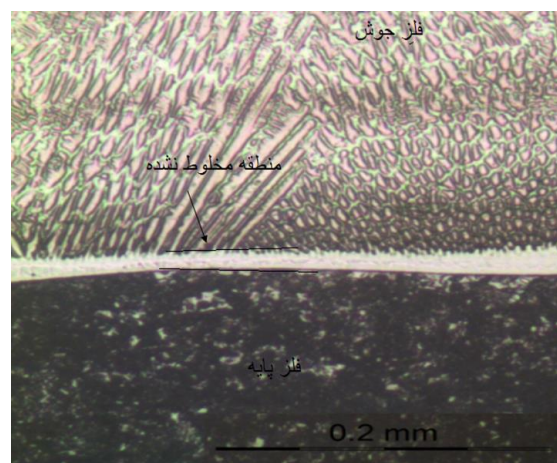


شکل (۱۶): نتایج آنالیز عنصری منطقه مخلوط نشده در مرز ذوب فلز پایه

فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L و فلز جوش ERNiCr-3

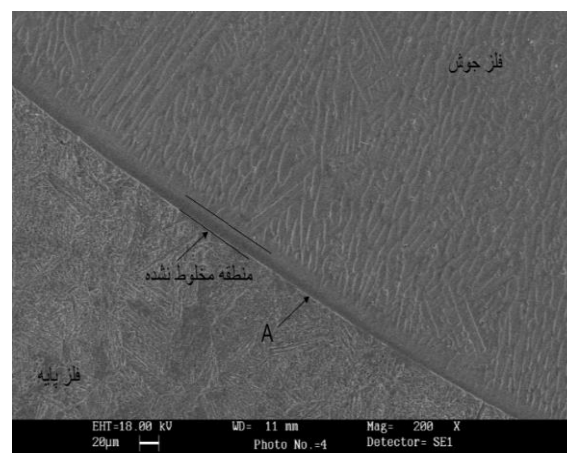
### ۳-۴- آزمایش ضربه و شکست نگاری فلزات جوش

میانگین نتایج آزمایش ضربه چارپی برای فلزات جوش مورد بحث این پژوهش در دمای محیط در جدول (۴) ارائه شده است. مقادیر انرژی شکست برای فلزات جوش نشان می‌دهند که شکست نرم برای تمامی آنها رخ داده است و در بین فلزات جوش، فلز پرکننده ERNiCr-3 دارای انرژی شکست ضربه بیش تری است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطوح شکست فلزات جوش ERNiCr-3 و ER309L، به ترتیب در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) ارائه شده است. برای هر دو نمونه شکل‌ها شامل دیمپل‌هاست که نشان می‌دهد نمونه‌ها زیر اعمال فشار کششی در حالتی انعطاف پذیر شکسته می‌شوند. تصاویر سطح شکست فلز جوش ERNiCr-3، مشخصه‌های یک شکست نرم را ارائه می‌کند. در این سطوح خطوط سیلان مشخص بوده و حالت پیوسته دارند. حفرات و دیمپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند. حضور دیمپل‌های درشت در شکست ناحیه آستنیتی، نشان دهنده شکست کاملاً نرم این فاز است. انرژی شکست فلز جوش ERNiCr-3، بیش‌تر از فلز جوش ER309L بود که این ناشی از ساختار کاملاً آستنیتی و انعطاف پذیر در ساختار فلز پرکننده ERNiCr-3 است.



شکل (۱۷): تصویر میکروسکوپ نوری، فصل مشترک فلز پایه A514 و فلز

جوش ERNiCr-3

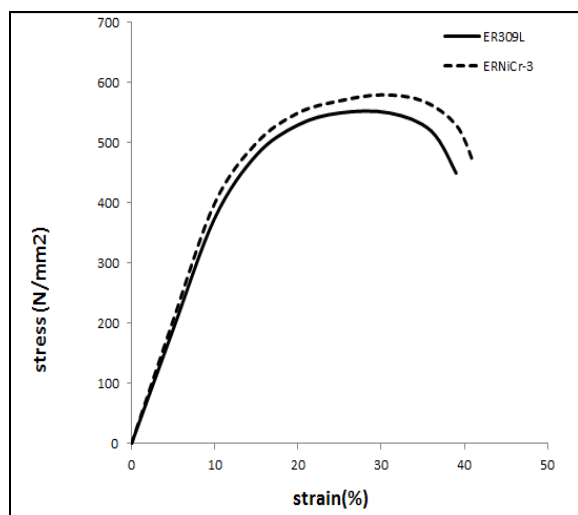


شکل (۱۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی، فصل مشترک فلز پایه A514 و

فلز جوش ERNiCr-3

### ۳-۵- آزمایش کشش

نمودارهای تنش بر حسب کرنش اتصالات جوشکاری شده برای دو اتصال غیر مشابه فلزات پرکننده ER309L و ERNiCr-3 در شکل (۲۲) به عنوان آزمایش کشش آورده شده است. نتایج حاصل از آزمون کشش در جدول (۵) نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که شروع تغییر شکل از منطقه متأثر از حرارت فولاد ۳۰۴L شروع شده و تا فلز پایه ادامه یافته است. نرم بودن فولادهای آستنیتی می‌تواند باعث چنین پدیده‌ای شود به طوری که این نوع فولاد با درصد ازدیاد طول گاه‌ها تا ۵۰ درصد در اتصال با یک فولاد مستحکم تر از خود، دچار شکست در فلز پایه می‌گردند. در این آزمایش هر دو نمونه از فلز پایه ۳۰۴L شکسته شد. در تمامی نمونه‌ها مربوط به فلزات جوش در هر دو حالت، درصد بالایی از افزایش طول رخ داده، مربوط به فلز پایه ۳۰۴L بوده و این به دلیل آن است که تسلیم در حین آزمایش کشش تمایل به شروع از محل نرمتر داشته است. در بین فلزات پرکننده پس از عملیات جوشکاری فلز جوش ERNiCr-3، بیشترین استحکام را دارا می‌باشد.

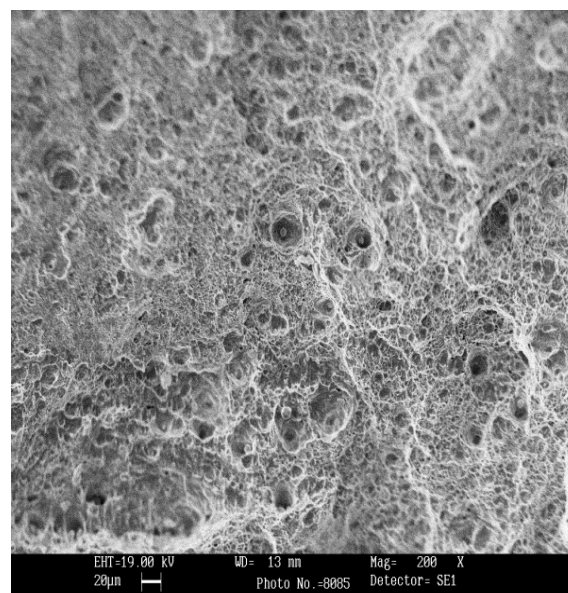


شکل (۲۲): نمودار تنش بر حسب کرنش مربوط به اتصال با فلز پرکننده

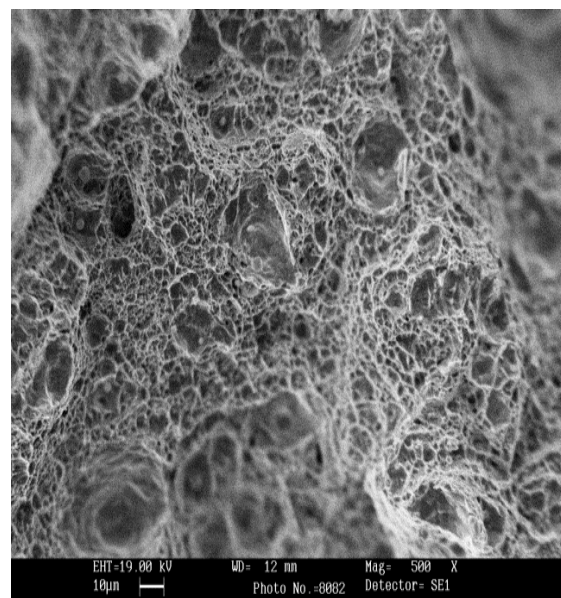
ER309L و ERNiCr-3

جدول (۴): میانگین نتایج حاصل از آزمایش ضربه برای فلزات جوش

نوع شکست	انرژی ضربه (ژول)	نوع فلز پرکننده
نرم	۱۱۷±۴	ERNiCr-3
نرم	۹۵±۵	ER309L



شکل (۲۰): سطح شکست فلز جوش ERNiCr-3



شکل (۲۱): سطح شکست فلز جوش ER309L

جدول (۵): نتایج حاصل از آزمایش کشش

نوع فلز پرکننده	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)	محل شکست
ER309L	۳۸۰±۱۰	۵۵۶±۱۰	۳۹±۳	فلز پایه ۳۰۴L
ERNiCr-3	۴۲۷±۱۰	۵۹۳±۱۰	۴۱±۳	فلز پایه ۳۰۴L

### ۳-۶- آزمایش ریزسختی سنجی

سختی تابعی از ترکیب شیمیایی، درصد آستنیت و فریت و تغییرات حرارتی فلزات پایه و فلزات جوش می‌باشد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در این تحقیق، از دو فولاد با ساختار متفاوت استفاده شد. با توجه به آن که هنگام جوشکاری نمونه‌ها، حرارت ورودی در محدوده مناسبی کنترل شد. حضور فازهای ترد در نمونه‌های جوش به حداقل رسیده است. شکل (۲۳) منحنی تغییرات سختی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده با فلزات پرکننده ERNiCr-3 و ER309L، نشان می‌دهد. در این منحنی ناحیه تحت آزمایش به ۵ ناحیه تقسیم شده است که به ترتیب فلز پایه 304L، سپس ناحیه متأثر از حرارت فولاد 304L و بعد از آن فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت فولاد A514 و در نهایت فلز پایه A514 را شامل می‌شود. با دقت در منحنی، در فلز پایه 304L، نقاط سختی بر روی یکدیگر قرار دارند که با واقعیت تطابق دارد. زیرا در آزمایش کشش نیز این نتیجه به دست آمد. به طوری که استحکام کششی در دو نمونه به علت عدم تغییر در ساختار و اندازه دانه، یکسان بود. با توجه به این که تغییرات استحکام و سختی در اکثر موارد همسو هستند، در این حالت نیز، سختی فلزات پایه با هم یکسان می‌باشند.

در ناحیه بعد سختی منطقه متأثر از حرارت فولاد 304L نشان داده شده است. در منطقه متأثر از حرارت با توجه به منطقه متأثر از حرارت در دو فلز پرکننده ERNiCr-3 و ER309L، حداکثر کاهش در میزان سختی نیز در این ناحیه می‌باشد. با افزایش حرارت در نزدیکی مرز جوش، قطر دانه‌های منطقه متأثر از حرارت افزایش پیدا می‌کند و سطح دانه که ناحیه نرم تر از مرز

دانه است وسعت بیشتری پیدا می‌کند. در نتیجه با نزدیک شدن به مرز جوش سختی کاهش پیدا می‌کند.

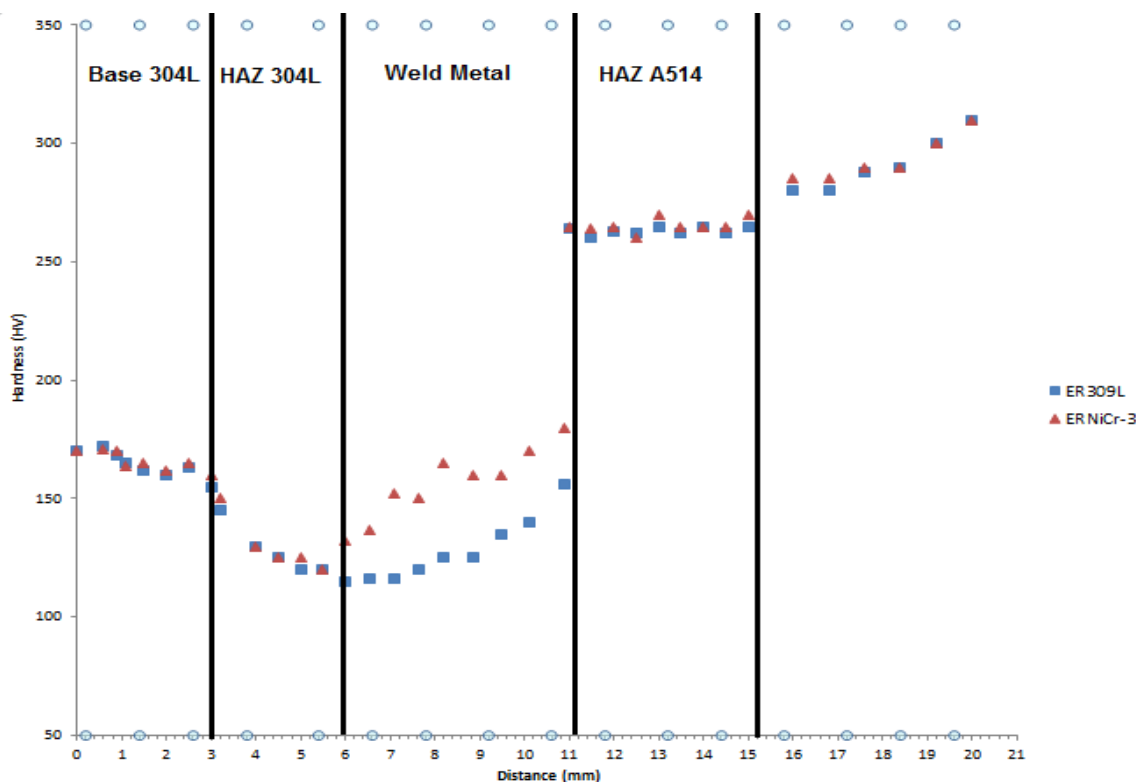
ناحیه بعدی، منطقه فلز جوش می‌باشد. در این ناحیه دیده می‌شود که اختلاف ابتدای ناحیه که در طرف فولاد 304L می‌باشد نسبت به طرف دیگر فلز جوش که در مجاورت فولاد A514 است، کمتر است. سختی منطقه جوش ERNiCr-3، بدلیل ساختار کاملاً آستنیتی سختی بیشتری نسبت به فلز جوش ۳۰۹L دارد. ریز ساختار ریز تر مناطق مرکزی به همراه قشر دانه‌های هم محور، سبب افزایش سختی در مرکز جوش می‌شود و با نزدیک شدن به فلز پایه فولاد کوئنچ تمپر شده، با افزایش مقدار کربن و احتمال وجود کاربیدهای (کاربید کروم) سختی افزایش یافته که می‌تواند به علت تغییر در ترکیب شیمیایی بین فولاد A514 و فلز پرکننده ERNiCr-3 رقیق شده، باشد. و در فلز جوش ۳۰۹L به واسطه ساختار آستنیتی و حضور مقدار قابل توجهی فاز فریت دلتا می‌توان کمترین مقدار سختی را انتظار داشت و با نزدیک شدن به فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L سختی تفاوت زیادی وجود ندارد که این امر بدلیل این است که فلز جوش و فولاد از خانواده فولاد زنگ نزن آستنیتی می‌باشند. و با نزدیک شدن به فلز پایه فولاد کوئنچ تمپر شده، با افزایش مقدار کربن و احتمال وجود کاربیدهای (کاربید کروم) سختی افزایش یافته که می‌تواند به علت تغییر در ترکیب شیمیایی بین فولاد A514 و فلز پرکننده ۳۰۹L رقیق شده، باشد.

ناحیه بعد، منطقه متأثر از حرارت فولاد A514 می‌باشد. در ابتدای این ناحیه از طرف فلز جوش، یک جهش در سختی دیده می‌شود که به دلیل ورود به یک ساختار متفاوت نسبت به فلز جوش است. بدین معنی که از یک ساختار کاملاً آستنیتی به

احتمال وجود مقداری بینیت و مارتنزیت در این ساختار، تمپر کردن منطقه متأثر از حرارت می‌تواند باعث افت سختی در منطقه متأثر از حرارت فولاد A514، می‌گردد.

ناحیه آخر، فلز پایه فولاد A514 می‌باشد. در این ناحیه با همان استدلال مربوط به فلز پایه فولاد 304L سختی در هر دو نمونه یکسان می‌باشد که این سختی به علت وجود ساختار کاملاً مارتنزیتی، دارای بالاترین میزان سختی در مقایسه با سایر ناحیه‌ها می‌باشد.

یک ساختار فریتی - پرلیتی که از لحاظ استحکام و سختی کاملاً متفاوت با ساختار فلز جوش می‌باشد، تبدیل می‌شود. این تغییر در ساختار به صورت یک جهش سختی خود را نشان می‌دهد. افت سختی در این ناحیه را می‌توان از دو دیدگاه بررسی کرد. اول این که با توجه به تغییر ساختار مارتنزیتی به فریتی - پرلیتی، ساختار از حالت سوزنی شکل مارتنزیتی به حالت دانه ای شکل تغییر یافته است. دیدگاه دیگر این است که، با توجه به ساختار منطقه متأثر از حرارت که از مرز جوش فاصله بیشتری دارد و



شکل (۲۳): منحنی تغییرات سختی بر روی نمونه‌های جوشکاری شده با فلزات پرکننده ER309L و ERNiCr-3

۱- برای فلز جوش ERNiCr-3 ساختار صد در صد آستنیتی و برای فلز پرکننده ER309L، ۵/۵ درصد فریت با استفاده از نمودار شیفلر بدست آمده است.

۲- در فصل مشترک فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L، برای فلز پرکننده ER309L، فریت تشکیل شده در طول مرز دانه‌های منطقه متأثر از حرارت رشد دانه‌ها را محدود کرد و احتمال ترک خوردن ذوبی منطقه متأثر از حرارت را کاهش داد و برای

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی خواص مقاطع جوش غیر مشابه به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304L به فولاد کوئنچ تمپر شده ASTM A514 ایجاد شده به روش جوشکاری تنگستن گاز پرداخته شد.



آستنیتهی AISI304L"، مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۱، صفحه ۹-۱، ۱۳۹۲.

[۴] م، شمعانیان و ع، اشرفی، متالورژی جوشکاری (ویرایش دوم)، مرکز نشر دانشگاهی صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.

[5] N. Arivazhagan, S. Surendra, S. Prakash & G. M. Reddy, "Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc Electron Beam and Friction Welding", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 3036-3050, 2011.

[6] J. Yan, M. Gao & X. Zeng, "Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, PP. 512-517, 2010.

[7] ASME, Sec II, Part C, Specifications For Welding Rods, Electrodes and Filler Metals, 2004.

[8] Naffakh, H. Shamanian & M. Ashrafizadeh, "Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657", *Journal of materials processing*, Vol. 209, pp. 3628-3639, 2009.

[9] M. Dehmlaei, M. Shamanian & A. Kermanpur, "Factors Affecting Weldability Improvement of Dissimilar Welds of Aged, HP Stainless Steel and Alloy 800", *International Journal of ISSI*, Vol. 5, pp. 15-21, 2008.

[10] H. Shah Hosseini, M. Shamanian & A. Kermanpur, "Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds", *Materials Characterization*, Vol. 62, pp. 425-431, 2011.

[۱۱] ح. شاه حسینی، م. شمعانیان و ا. کرمان پور، "ارزیابی خواص مکانیکی اتصال غیر مشابه اینکونل ۶۱۷ به فولاد زنگ نزن آستنیتهی ۳۱۰ AISI"، *نهمین کنفرانس جوش و بازرسی*، صفحه ۱۴-۲۱، ۱۳۸۷.

[12] M. Reddy, G. Mohands & T. Tagore, "Welding studies of high-strength low-alloy steel using austenitic fillers", *Journal of Materials Processing*, Vol. 1, pp. 213-228, 2000.

[13] L. Schaeffler, "Selection of Austenitic Electrodes

فلز جوش ERNiCr-3 در حد فاصل بین فلز پایه و فلز جوش یک منطقه مخلوط نشده (UMZ) به وجود آمد.

۳- در فصل مشترک فولاد کوئنچ و تمپر شده شده A514 در طی جوشکاری، برای فلز پرکننده ER309L، احتمال مهاجرت کربن از منطقه متأثر از حرارت به ناحیه ذوب وجود داشت. برای فلز جوش ERNiCr-3 منطقه ذوب جزئی و منطقه مخلوط نشده از عرض چندانی برخوردار نبود.

۴- در آزمایش کشش تمامی نمونه‌ها، از منطقه منطقه متأثر از حرارت فلز پایه ۳۰۴L و به صورت نرم دچار شکست شدند. میانگین استحکام کششی در فلز جوش ER309L، ۵۵۶MPa و در فلز جوش ERNiCr-3 دارای استحکام کششی ۵۹۳MPa، افزایش پیدا کرده است.

۵- میانگین انرژی ضربه در فلز جوش ER309L، ۹۵ ژول و در فلز جوش ERNiCr-3، ۱۱۷ ژول افزایش پیدا کرده است.

۶- فلز جوش ERNiCr-3 بیشترین سختی، ۱۵۶ ویکرز را دارا بود، در حالی که فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتهی ER309L، ۱۲۷ ویکرز کمترین مقدار را دارا بود.

۷- می‌توان نتیجه گرفت که برای اتصالات بین فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتهی ۳۰۴L و فولاد کوئنچ و تمپر شده A514، ماده‌ی پرکننده‌ی ERNiCr-3 ویژگی‌های بهتری از لحاظ خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه و سختی سنجی ارائه داده است.

## ۵- مراجع

[1] J. C. Lippold, D. J. Koteki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley & Sons Inc, 2005.

[۲] پ، شایان فر و م، شمعانیان، "جوشکاری غیر مشابه کوئنچ - تمپر ASTM A517 به فولاد زنگ نزن AISI316L و تاثیر بهینه سازی پارامترهای جوشکاری بر ریز ساختار"، *مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، شماره ۳، صفحه ۷۵-۸۹، ۱۳۹۳.

[۳] م، رحمانی و م، شمعانیان "ارزیابی ریز ساختار جوش های غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دو فازی UNS32750 به فولاد زنگ نزن

for Welding Dissimilar Metals”, Welding Journal, pp. 601-620, 1947.

[14]c. Jang, J. Lee & S. Jong, “Mechanical Property Variation Within Inconel 82/182 Dissimilar Metal Weld between Low Alloy Steel and 316 Stainless Steel”, Department of Nuclear and Quantum Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 1-23, 2002.

[۱۵]م، شمعانیان و م. رحیمی " متالورژی جوشکاری و جوش پذیری فولادهای زنگ نزن" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان،