

## تأثیر فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد ۴۱۳۰ به فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ L

مسعود پورکبیریان<sup>۱</sup>، حسین مستعان<sup>۱\*</sup> و مهدی رفیعی<sup>۱</sup>

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

۲- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۶/۲۱)

چکیده- در این پژوهش، اتصال غیرمشابه فولاد کم آلیاژ ۴۱۳۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L به روش جوشکاری قوسی تنگستن- گاز مورد بررسی قرار گرفت. از دو فلز پرکننده ERNiCr-۳ و فولاد زنگ‌نزن ER۳۰۹L به این منظور استفاده شد. پس از جوشکاری، ریزساختار مناطق مختلف هر اتصال شامل فلز جوش، مناطق متأثر از حرارت و فصل مشترک‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال از آزمون‌های ضربه و کشش استفاده شد. مشاهدات انجام شده توسط SEM نشان داد که در آزمون ضربه، شکست نمونه‌ها به صورت نرم می‌باشد. در آزمون کشش نمونه جوش داده شده با سیم جوش ER۳۰۹L از فولاد پایه ۳۱۶L دچار شکست شد، اما نمونه جوش داده شده با سیم جوش ERNiCr-۳ از محل جوش دچار شکست شد. بررسی‌ها نشان‌دهنده وجود ساختار دندریتی در فلزات جوش پایه نیکلی بود. ریزساختار فلز پرکننده فولاد ER۳۰۹L به صورت سلولی- دندریتی بوده و به دلیل وجود فاز فریت دلتا در نواحی بین دندریتی آستنیت زمینه، هیچ‌گونه ترکی در این اتصال مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: اتصال غیرمشابه، جوشکاری GTAW، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶، فولاد کم آلیاژ ۴۱۳۰، اینکونل ۸۲، خواص مکانیکی.

## The Effect of Filler Metal on Properties of AISI 4130 to AISI 316L Dissimilar Joint

M. Poorkabirian<sup>1</sup>, H. Mostaan<sup>1,2\*</sup> and M. Raffiei<sup>1</sup>

1. Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
2. Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

**Abstract:** In this research, dissimilar welding between 4130 low alloy steel and austenitic stainless steel 316L has been investigated using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Two types of filler metals, including ERNiCr-3 and ER309L, were used for this purpose. Moreover, the joint microstructures including the weld metals, heat affected zones and interfaces were characterized by optical and Scanning Electron Microscopy (SEM). The mechanical behavior of the joint was tested by impact and tension tests. Observations by SEM showed that in impact test, the fracture is soft. In the tensile test, the welded sample by ER309L filler metal was fractured from 316L base metal, but welded specimen with ERNiCr-3 was fractured from welded zone. Also, the results showed a dendritic structure in the nickel-based weld metal. No crack was found in the cellular-dendritic microstructure of ER309L weld metal due to the existence of delta ferrite between them.

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hossein.mostaan@gmail.com

## ۱- مقدمه

فولاد AISI ۴۱۳۰ فولادی کم آلیاژ با استحکام بالا و عملیات حرارتی پذیر می‌باشد. این فولاد دارای میزان کربن متوسط بوده و دارای عناصری آلیاژی نظیر کروم، مولیبدن، منگنز و دیگر عناصر می‌باشد [۱]. کاربرد این نوع فولادها در صنایع نفت و نیروگاه‌های برق می‌باشد. همچنین به دلیل مقاومت در برابر اکسید شدن و استحکام بسیار خوب در درجه حرارت‌های بالا، در انواع مولدها و مبدل‌های حرارتی کاربرد دارد. این فولاد همچنین در مخازن تحت فشار در صنایع پتروشیمی نیز استفاده می‌شود. این گروه فولادها به صورت نرماله، تمپر شده و کوئنچ-تمپر شده استفاده می‌شوند. کروم در فولاد، مقاومت به خوردگی و مولیبدن استحکام در درجه حرارت‌های بالا را افزایش می‌دهد [۲ و ۳].

فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پس از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ دومین فولاد زنگ‌نزن رایج در بین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی است. این فولاد به فولاد زنگ‌نزن گرید دریایی نیز معروف است و معمولاً شامل ۱۶ درصد کروم، ۱۰ درصد نیکل و دو درصد مولیبدن است. تغییر در نسبت کروم و نیکل و افزودن مولیبدن باعث مقاومت بیشتر این فولاد در مقابل خوردگی، به ویژه خوردگی ناشی از کلر می‌گردد و به این دلیل برای تجهیزاتی که باید در تماس زیاد با عوامل خوردنده نظیر مواد شیمیایی، حلال‌ها، و آب شور باشند، مناسب است. فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در صنایع مختلفی نظیر نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع غذایی و دارویی مصارف گوناگونی دارد. از این آلیاژ برای ساخت لوله و ورق‌های مقاوم در محیط‌های اسیدی استفاده می‌شود و قیمت آن نسبت به گریدهای مشابه مانند فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بیشتر است [۴ و ۵].

اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن به فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا در صنایع مختلفی نظیر نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاه‌های حرارتی و صنایع غذایی دارای کاربردهای فراوان

می‌باشد. در اکثر صنایع مذکور خطوط لوله انتقال دهنده سیالات و نازل‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن و مخازن و قسمت‌های تحت فشار سیستم از جنس فولاد کم آلیاژ ساخته می‌شوند و اتصال این اجزا به روش جوشکاری انجام می‌گردد و یکی از اتصالات اساسی موجود در این صنایع می‌باشد [۲، ۳ و ۶]. با توجه به کاربرد گسترده فولادهای کم آلیاژ و فولادهای زنگ‌نزن در صنایع مختلف و نیاز فراوان به اتصال این دو نوع فولاد به یکدیگر، توسعه و بهینه‌سازی خواص این اتصال همواره مورد توجه قرار گرفته است. در گذشته کاربرد فیلرهای مختلف در اتصال این نوع فولادها مورد بررسی قرار گرفته است [۳ و ۶].

پانیندرا و همکاران [۳] به بررسی خواص اتصال غیرمشابه فولادهای AISI ۴۱۴۰ و AISI ۳۱۶ ایجاد شده با روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) پرداختند. در این بررسی محققان خواص اتصال را در دو حالت بدون فلز پرکننده و با استفاده از فلز پرکننده بررسی نمودند. فلز پرکننده مورد استفاده ER۳۰۹L بود. نتایج نشان داد خواص اتصال در هر دو حالت قابل قبول می‌باشد. جانگ و همکاران [۶] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات فولادی کم آلیاژ SA۵۰۸ به فولاد ۳۱۶ با روش GTAW، به وسیله فلز پرکننده ایکونل ۸۲/۱۸۲ پرداختند. این نوع اتصال در راکتورهای هسته‌ای کاربرد دارد. در این بررسی مشاهده گردید خواص مکانیکی و ریزساختار در طول ضخامت جوش متفاوت می‌باشد. در بررسی‌های انجام شده علت ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها، تنش پسماند تشخیص داده شد. در این راستا پژوهشی مشابه با تحقیق جانگ و همکاران توسط کیم و همکاران [۷] انجام شد، با این تفاوت که در این بررسی محققین از عملیات حرارتی پس گرم در دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد برای کاهش تنش پسماند استفاده نمودند که نتایج حاصل رضایت بخش بود. ریزساختار فلز جوش به صورت دندریتی و بررسی سطح شکست، نشان‌دهنده شکست نرم بود.

در مورد روش‌های مختلف جوشکاری این دو نوع فولاد در گذشته بررسی‌هایی صورت گرفته است. آریواژاگان و همکاران [۲] به بررسی خواص اتصال فولادهای AISI ۴۱۴۰ و AISI ۳۰۴ توسط روش‌های GTAW، جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی (FSW) و جوشکاری پرتوی الکترونی (EBW) پرداختند. نتایج نشان داد که اتصال به روش EBW دارای بیشترین استحکام کششی و روش GTAW دارای بیشترین مقاومت به ضربه می‌باشد.

در میان روش‌های مختلف جوشکاری ذوبی، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در اتصال فلزات غیرمشابه که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است، جوشکاری GTAW می‌باشد. این روش دارای مزایای فراوان می‌باشد که از جمله می‌توان به تمیز بودن جوش، کنترل نسبی میزان رقت و کم هزینه بودن این روش اشاره کرد [۱ و ۸]. این روش در عین دارا بودن مزایای بسیار، در مقایسه با برخی روش‌ها نظیر جوشکاری پرتوی الکترونی<sup>۱</sup> (EBW) و جوشکاری پرتوی لیزر<sup>۲</sup> (LBW) دارای نقاط ضعفی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به عمق نفوذ کمتر، ایجاد منطقه HAZ وسیع‌تر و ایجاد اعوجاج در مقاطع نازک اشاره نمود [۱ و ۹].

در راستای بهبود خواص جوش GTAW، احمدی و ابراهیمی [۸] به بررسی اثر فلاکس فعال در عمق نفوذ جوشکاری GTAW فولاد ۳۱۶L پرداختند که نتایج نشان‌دهنده افزایش عمق نفوذ و افزایش استحکام بود. چاندر و همکاران [۱۰] تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری بر چقرمگی و سختی اتصال فولادهای AISI ۴۱۴۰ و AISI ۳۰۴ به روش جوشکاری اصطکاکی را بررسی نمودند. پارامترهای اصلی مورد بررسی در این پژوهش نیروی اصطکاکی و نیروی فورج بود. سهم هر یک از پارامترهای مذکور و اهمیت این پارامترها به روش تاگوچی تعیین گردید که نتایج نشان داد که پارامتر نیروی اصطکاکی به خصوص در میزان چقرمگی اتصال دارای بیشترین اثر می‌باشد.

اوزدمیر و همکاران [۱۱] به بررسی خواص اتصال از نظر

سرعت چرخش در جوشکاری اصطکاکی فولاد AISI ۳۰۴ به فولاد AISI ۴۳۴۰ پرداختند. جوشکاری اصطکاکی با پنج سرعت مختلف چرخش با استفاده از یک دستگاه انجام شد. مشاهده گردید استحکام کششی با افزایش سرعت چرخش افزایش می‌یابد. بنابر تحقیقات انجام شده توسط نگارندگان مقاله، تاکنون گزارشی در مورد اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L به فولاد کم آلیاژ AISI ۴۱۳۰ در منابع مشاهده نشده، بنابراین در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L به فولاد کم آلیاژ AISI ۴۱۳۰ توسط فرایند GTAW با پرکننده‌های ER۳۰۹L و ERNiCr-۳ پرداخته شده است. نویسندگان بر این عقیده هستند که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در استفاده بهینه از این دو آلیاژ در کاربردهای صنعتی مثر ثمر واقع گردد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- مواد مصرفی

در این پژوهش از ورق فولاد کم آلیاژ AISI ۴۱۳۰ و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L استفاده شد. آنالیز کوانتومتری جهت تعیین دقیق ترکیب شیمیایی ورق‌های خریداری شده انجام گردید. ترکیب شیمیایی فلزات پایه در جدول ۱ ارائه شده است. جهت اتصال فلزات پایه از دو فلز پرکننده فولاد زنگ‌نزن ER۳۰۹L و اینکونل ERNiCr-۳ استفاده شد. در تمامی موارد از سیم جوش‌هایی با قطر ۲/۴ میلی‌متر جهت پاس ریشه و در ادامه جهت روئشانی پاس بعدی استفاده شد. به‌منظور ارائه دقیق ترکیب شیمیایی سیم‌جوش‌های به‌کار گرفته شده، از اطلاعات درج شده توسط کارخانه سازنده استفاده شد. در انتخاب فلزات پرکننده در این پژوهش علاوه بر ترکیب شیمیایی، پارامترهای دیگری مانند خواص مکانیکی حاصله، پایداری حرارتی، مقاومت به خوردگی، ضریب انبساط حرارتی، در دسترس بودن و هزینه‌ها مدنظر قرار گرفت. بر همین اساس از استانداردهای AWS A۵/۹ و AWS

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده براساس درصد وزنی

Ti	Nb+Ta	Al	Cu	Ni	Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C	Fe	
-	-	۰/۰۳۲	۰/۰۶۵	۰/۰۲۱	۰/۲۱۹	۰/۷۰۸	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳	۰/۵۴۷	۰/۴۳	۰/۲۴۹	۹۷/۲	AISI ۴۱۳۰
-	-	۰/۰۰۹	۰/۴۸۵	۹/۵۲	۱/۹۷	۱۷/۴	۰/۰۱۰	۰/۰۳۶	۱/۸۳	۰/۴۹۷	۰/۰۵۱	۶۷/۷	AISI ۳۱۶L
-	-	-	-	۱۳/۵	-	۲۳/۵	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲	۲/۰	۰/۴۰	۰/۰۱۵	Bal	ER ۳۰۹L
۰/۷۵	۲-۳	-	۰/۵۰	۶۷/۰+Co	-	۲۲-۱۸	۰/۰۱۵	-	۳/۵-۲/۵	۰/۵	۰/۱	۳/۰	ER NiCr-۳

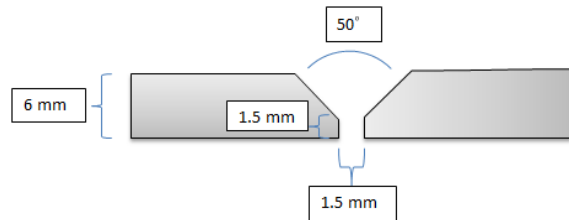
جدول ۲- پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

وضعیت	پارامتر
DCEN	قطبیت الکتروود
۵ Bar	فشار گاز اعمالی
Ar (PURE)	ترکیب گاز محافظ
۲/۴ mm	قطر سیم جوش
۱۵-۱۴V	ولتاژ
۲۲۰-۱۵۰A	محدوده جریان
۲-۲/۵mm/s	سرعت جوشکاری
۲۵°C	دمای پیشگرم
۱۰۰°C	دمای بین پاسی
۱G	وضعیت جوشکاری

به قطر ۲/۴ میلی متر بود. گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹ درصد با فشار ۴ الی ۵ بار به عنوان گاز محافظ استفاده شد. دمای بین پاسی ۱۰۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد، تا تنش های پسماند ناشی از انقباض و سرد شدن فلز جوش به حداقل مقدار ممکن برسد. در هر پاس مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه گیری و کنترل شد (جدول ۲).

#### ۲-۴- بررسی ریزساختار

به منظور مطالعه و بررسی ریزساختار مناطق مختلف در فلزات پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت<sup>۳</sup> (HAZ) و همچنین تحولات ریزساختاری، از روش متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی مختلف استفاده گردید. بدین صورت که ابتدا نمونه ها توسط اهر نواری در ابعاد ۳۰×۱۵



شکل ۱- طراحی اتصال فلزات پایه

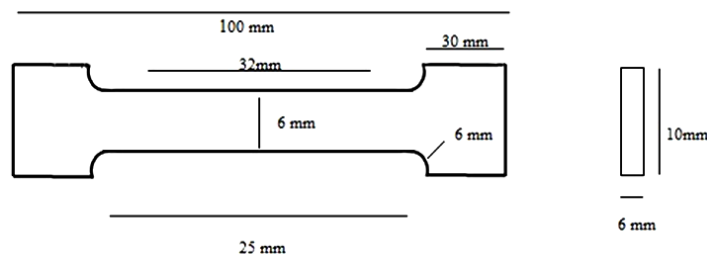
A5/۱۴ و مشخصات ارائه شده از طرف تولیدکنندگان استفاده گردید.

#### ۲-۲- آماده سازی نمونه ها و طراحی اتصال

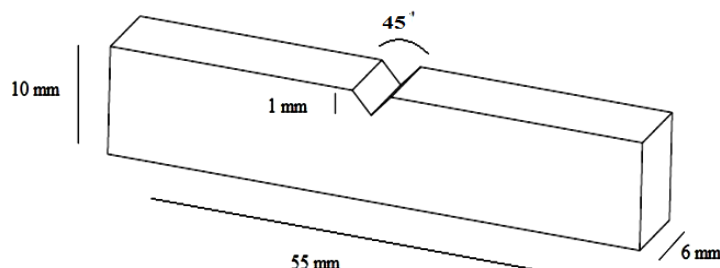
در این پژوهش دو ورق از جنس فولاد زنگ نزن آستینیتی AISI ۳۱۶L و فولاد AISI ۴۱۳۰ با ابعاد ۳۰۰×۷۰×۶ میلی متر به عنوان فلزات پایه تهیه شد و براساس استاندارد AWS D1/۱ به صورت جناغی یک طرفه لبه سازی گردید. زاویه لبه هر ورق در ناحیه شیار جوش ۲۵ درجه و در مجموع ۵۰ درجه مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شد. عملیات لبه سازی توسط ماشین فرز و با کیفیت بالا انجام گردید. سپس مراحل سمباده زنی، چربی زدایی و تمیزکاری قطعات جهت انجام فرایند جوشکاری انجام شد.

#### ۳-۲- جوشکاری نمونه ها

اتصال ورق ها با استفاده از سیم جوش های ER۳۰۹L و ERNiCr-۳ به قطر ۲/۴ میلی متر و به روش GTAW، توسط دستگاه با مدل ESAB DTA ۳۰۰، بدون پیش گرم کردن نمونه ها و با قطبیت DCEN به صورت ۱G انجام گردید. الکتروود مصرف نشدنی مورد استفاده، الکتروود تنگستنی حاوی دو درصد توریم



شکل ۲- جزئیات نمونه آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8



شکل ۳- جزئیات نمونه آزمون ضربه شاریبی

در مرکز نمونه قرار گیرد تهیه شد. مطابق شکل (۳) شیاری به عمق یک میلی‌متر و با زاویه ۴۵ درجه بر روی نمونه در فلز جوش ایجاد شد. این آزمون توسط دستگاه سنتام مدل ۳۰۰ SIT در دمای محیط انجام شد. جهت انجام آزمون‌های کشش و ضربه، از هر قطعه ۳ نمونه برای هر آزمون طبق مشخصات بالا تهیه گردید. همچنین ریزسختی سنجی و یکرز بر روی نمونه‌ها در راستای پهنای جوش، در سطح مقطع برش عرضی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E-۹۲ انجام شد. تصاویر سطح مقطع شکست نمونه‌های آزمون کشش و ضربه به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی از نوع VARIABLE PRESSURE SEM (LMU & XMU) مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

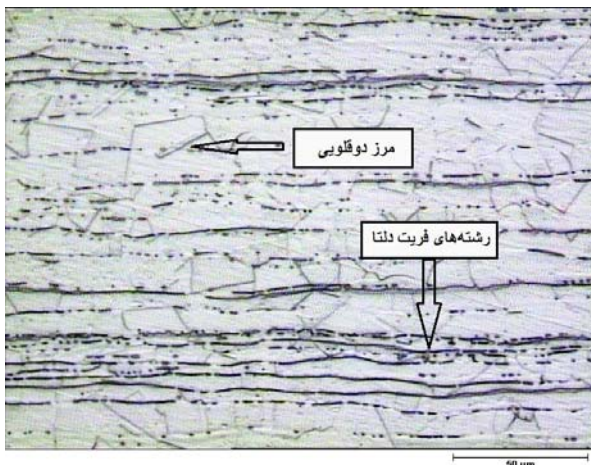
#### ۳-۱- ریزساختار فلزات پایه

شکل (۴) تصویر میکروسکوپی نوری از ریز ساختار فولاد ۴۱۳۰ را نشان می‌دهد. ساختار شامل بینیت، فریت و نواحی پرلیت می‌باشد. این آلیاژ معمولاً در حالت آنیل شده یا تمپر شده جوشکاری می‌گردد، مگر اینکه هدف تعمیر قطعه باشد که

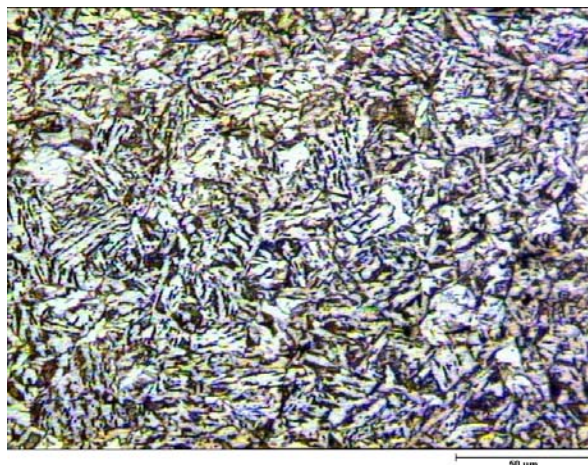
میلی‌متر بریده شد، سپس نمونه‌ها توسط دستگاه‌های نیمه اتوماتیک سنبناده و پولیش، طبق استاندارد ASTM E۳-۱۱ آماده‌سازی گردید. پس از انجام فرایند آماده‌سازی، عملیات میکرو اچ نمونه‌ها توسط محلول‌های اچ نایتال (۱ الی ۵ میلی‌لیتر نیتریک اسید در ۹۵-۹۹ میلی‌لیتر اتیل الکل) و گلیسرثیا (سه بخش گلیسرول، ۲-۵ بخش کلریک اسید، یک بخش استیک اسید) و محلول اچ رنگی براها (۵ گرم تیوسیدیم سولفید + ۳ گرم پتاسیم متابیوسولفید + ۱۰۰ میلی‌لیتر آب) طبق استاندارد ASTM E ۴۰۷-۲۰۱۵ انجام شد.

#### ۲-۵- ارزیابی خواص مکانیکی

جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال، برای تعیین استحکام کششی جوش از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E۸، توسط دستگاه کشش مدل INSTRON- ۴۴۸۶ استفاده شد. مشخصات نمونه برای آزمون کشش طبق استاندارد در شکل (۲) نشان داده شده است. جهت تعیین میزان انرژی ضربه از آزمون ضربه شاریبی استفاده شد، بدین صورت که از فلز جوش، نمونه‌هایی با ابعاد ۵۵×۱۰×۶ میلی‌متر به گونه‌ای که نقطه اتصال



شکل ۵- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L با زمینه آستنیت و رشته‌های فریت دلتا



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فولاد AISI ۴۱۳۰ شامل بینیت، فریت و پرلیت

ترد سیگما باعث کاهش انعطاف پذیری و چقرمگی آلیاژ خواهد شد [۲ و ۱۲].

### ۳-۲- میزان رقت فلز جوش

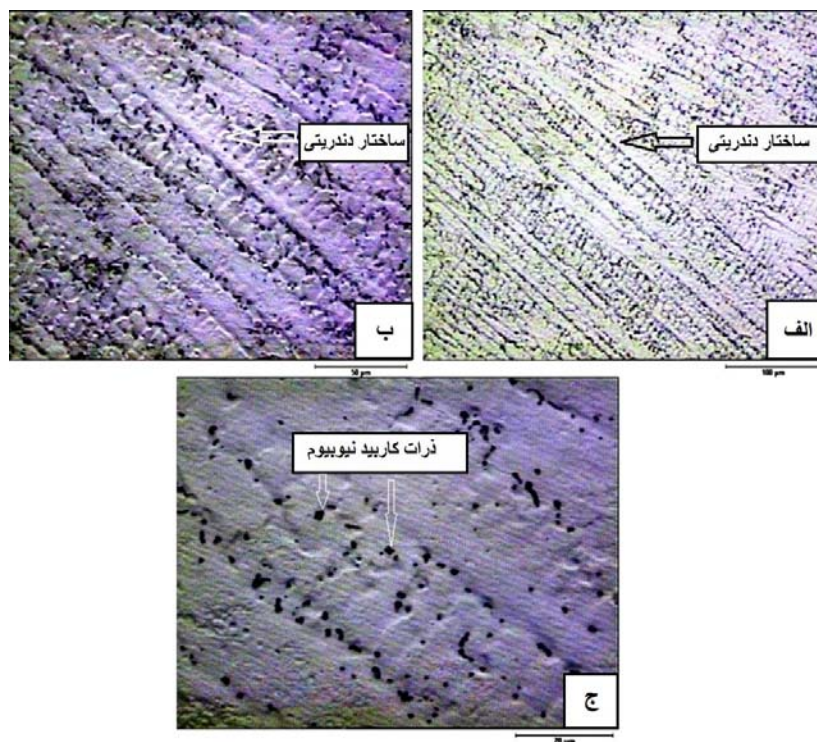
جهت تعیین میزان رقت ابتدا از هر قطعه نمونه‌ای با مشخصات یک نمونه متالوگرافی تهیه و سپس منطقه جوش ماکرو اچ گردید، سپس مساحت منطقه جوش محاسبه شد و با مقایسه این مساحت و مساحت سطح مقطع فرضی لبه‌سازی انجام شده میزان رقت محاسبه گردید. میزان رقت در هر دو نمونه به‌طور تقریبی شامل ۶۰ الی ۶۵ درصد فلز پرکننده و مابقی فلز پایه می‌باشد. در نمونه جوشکاری شده توسط ERNiCr-۳ به‌علت میزان بالای نیکل در فلز پرکننده و همچنین میزان قابل توجه این عنصر در فلز پایه ۳۱۶ مطابق جدول (۱)، این میزان رقت اثری در تغییر ساختار قابل پیش‌بینی جوش ندارد. در مورد نمونه جوش داده شده توسط ER۳۰۹L، با در نظر گرفتن میزان عناصر آلیاژی در فلزات پایه به‌خصوص فولاد ۳۱۶ مطابق جدول (۱) و طبق محاسبات میزان رقت عناصر، میزان عناصر به‌گونه‌ای است که طبق نمودار شیفلر، فلز جوش در همان محدوده فازی ER۳۰۹L قرار دارد.

در این حالت آنیل یا تمپر قبل از جوشکاری عملی نیست. با انجام عملیات آنیل علاوه بر یکنواختی در ترکیب شیمیایی، در اثر وقوع فرایند تبلور مجدد، ساختاری با دانه‌های هم‌محور ایجاد می‌شود و با افزایش زمان آنیل، دانه‌ها فرصت رشد یافته و در نهایت ساختاری شامل دانه‌های هم‌محور نسبتاً بزرگ به‌وجود می‌آید [۱].

تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L در شکل (۵) آورده شده است. ریزساختار دارای زمینه آستنیتی بوده و از دانه‌های هم‌محور تشکیل شده و همچنین مرزهای دوقلویی آنیل در سرتاسر ساختار به چشم می‌خورند. چنین ساختاری نتیجه فرایند آنیل پس از عملیات نورد است، این عملیات به‌منظور بهبود خواص خوردگی و شکل‌پذیری آلیاژ انجام می‌گردد. همچنین طی فرایند آنیل، اکثر رسوبات ایجاد شده در فرایند تولید فولاد که طی عملیات نورد دچار تغییر شکل شده‌اند حذف می‌گردند [۴، ۱۲ و ۱۴].

در شکل (۵) وجود رشته فریت دلتا کاملاً مشخص می‌باشد، هر چند که مقدار این فاز در ساختار خیلی زیاد نیست. وجود فریت دلتا روند به‌وجود آمدن فاز سیگما در آلیاژ را، پس از قرار گرفتن طولانی مدت در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تسریع می‌کند. وجود فاز





شکل ۶- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار مرکز جوش فلز پرکننده اینکونل ۸۲ در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

### ۳-۳- ریزساختار فلز جوش

یکی از مواد پرکننده مورد استفاده برای اتصال غیرمشابه در این تحقیق اینکونل ۸۲ (ERNiCr-۳) می‌باشد. ساختار دانه‌بندی فلز جوش مربوط به این فلز پرکننده در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶)، ریز ساختار مطابق انتظار کاملاً آستنیتی بوده و از دانه‌های تقریباً هم‌محور تشکیل شده است. درون دانه‌ها، ساختار دندریتی-سلولی ساختار غالب می‌باشد و بازوهای دندریتی در شکل (۶) کاملاً مشخص می‌باشد، هر چند که دندریتهای هم‌محور نیز در برخی از دانه‌ها وجود دارند. جهت‌گیری رشد دندریتهای در هر دانه متفاوت است و در واقع یک نوع رشد رقابتی در ساختار قابل مشاهده است. در شکل (۶) رسوباتی مشاهده شد که پس از انجام ارزیابی به روش طیف سنجی تفریق انرژی EDS<sup>۲</sup> مطابق شکل (۷)، این رسوبات غنی از نیوبیوم بودند.

براساس گزارش‌های منتشر شده [۱۳]، تشکیل رسوبات غنی از نیوبیوم به صورت NbC در جوشکاری با این فلز پرکننده

گزارش شده است. ضریب جدایش نیوبیوم در آلیاژهای پایه نیکل کمتر از یک بوده و در نتیجه این عنصر تمایل زیادی به جدایش در مناطق بین دندریتی دارد. علاوه بر این حضور سایر عناصر آلیاژی، قابلیت انحلال این عنصر در نیکل را کاهش می‌دهد [۱۲ و ۱۳].

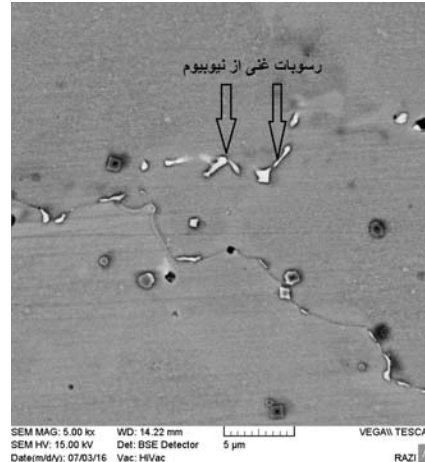
فلز پرکننده دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت فلز پرکننده ER۳۰۹L بود. به‌طور کلی نوع انجماد در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به عواملی همچون ترکیب شیمیایی و فاکتورهای سینتیکی مانند سرعت سرد شدن بستگی دارد. مهمترین عامل، مقدار کروم و نیکل معادل و نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  در ترکیب شیمیایی است [۱۴ - ۱۷]. همچنین با توجه به نمودار شیفلر که برای فرایندهای غیرتعادلی جوشکاری طراحی شده است، ساختار به‌دست آمده آستنیتی-فریتی خواهد بود. مطابق شکل (۸) ترکیب این فلز جوش به نحوی است که در بخش غنی از نیکل و در سمت راست مثلث یوتکتیک سه فازی قرار می‌گیرد و بنابراین فاز

Spectra: INCONEL 82 FILLER

Element Series un. C norm. C Atom. C  
[wt.-%] [wt.-%] [at.-%]

Carbon K series 3.63 4.21 20.76  
Titanium K series 2.13 2.47 3.05  
Chromium K series 9.16 10.64 12.11  
Iron K series 14.81 17.22 18.24  
Nickel K series 9.59 11.15 11.24  
Niobium L series 46.72 54.31 34.59

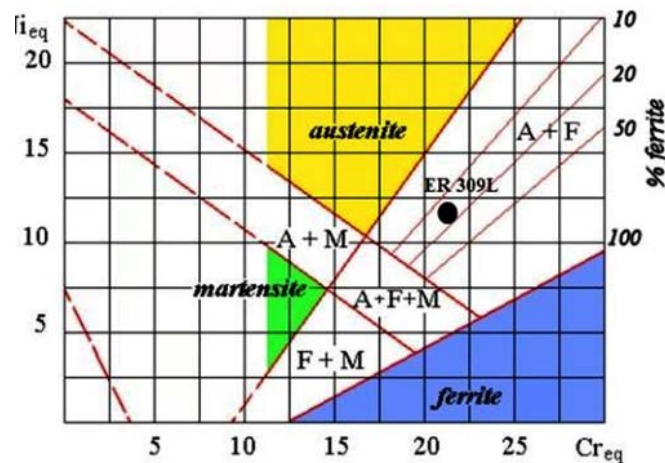
Total: 86.0 %



(ب)

(الف)

شکل ۷- الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ریزساختار فلز جوش ERNiCr-۳ به همراه، ب) EDS از رسوبات

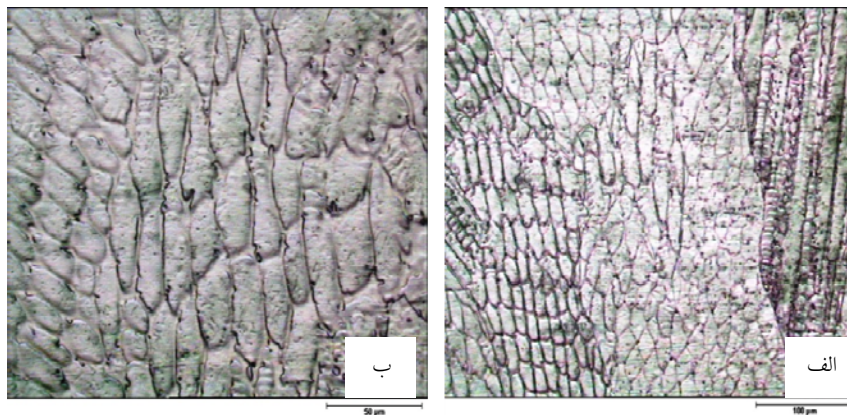


شکل ۸- موقعیت فولاد ۳۰۹ در نمودار شیفلر [۴].

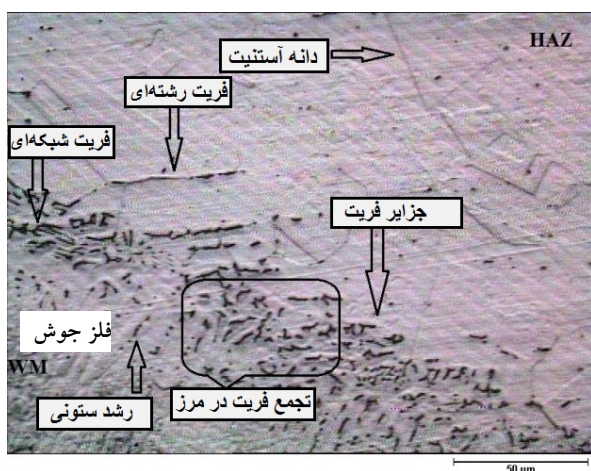
تشکیل می‌شود [۲ و ۴]. در شکل (۹) سلول‌ها و دندریتهای آستنیت به رنگ روشن و فریت دلتا به عنوان فاز دوم با رنگ تیره تر در ساختار مشاهده می‌شود. ساختار فلز جوش پایه نیکلی عمدتاً به صورت دندریتی، همراه با دندریتهای ثانویه قابل مشاهده می‌باشد، در صورتی که در فلز جوش ER309L دندریتهای ثانویه به سختی دیده می‌شود و در قسمت‌هایی از آن، ساختار سلولی وجود دارد. تفاوت در میزان تحت انجماد در جبهه انجماد به دلیل وجود

اولیه در انجماد آستنیت می‌باشد. حالت انجماد در این شرایط شامل فریت در بین دندریتهای سلول‌های آستنیت و یا به صورت آستنیت اولیه همراه با فریت به عنوان فاز دوم (AF) خواهد بود [۲]. در ساختار به دست آمده مطابق شکل (۹)، فریت دلتا مشاهده می‌گردد. در منطقه‌ای در مرکز حوضچه مذاب نرخ سرد شدن به اندازه‌ای پایین می‌باشد که زمان کافی برای جدایش عناصر پایدار کننده فریت، ایجاد شده و در مناطق بین دندریتی فریت

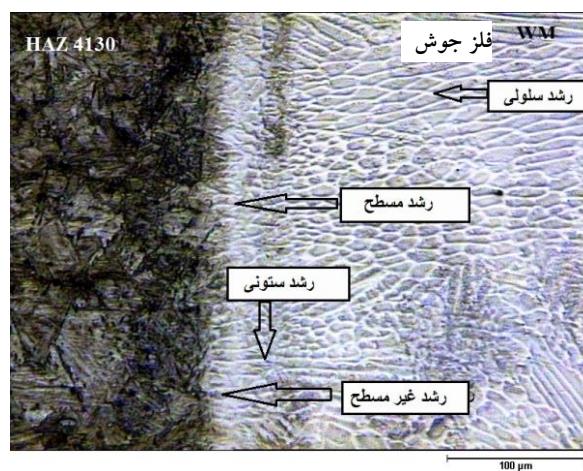




شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار مرکز جوش حاصل از فلز پرکننده ۳۰۹L در بزرگنمایی‌های متفاوت



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فصل مشترک در سمت فولاد ۳۱۶ L، جوشکاری شده توسط ER۳۰۹L



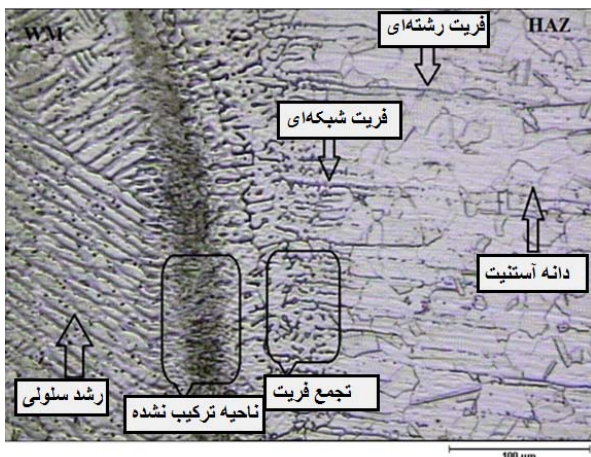
شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فصل مشترک در سمت فولاد ۴۱۳۰ AISI، جوشکاری شده توسط ER۳۰۹L

شده توسط ER۳۰۹L نشان داده شده است. در فصل مشترک سمت ۴۱۳۰ AISI همان‌گونه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، رشد به دو صورت مسطح (رونشینی) و هم غیرمسطح قابل مشاهده می‌باشد. رشد مسطح به علت شیب حرارتی بالا در حوضه جوش ایجاد می‌شود. در ادامه جوانه‌زنی و رشد به صورت سلولی و ستونی در داخل ناحیه ذوب شده دیده می‌شود که این ساختارها تابع شرایط انتقال حرارت و ترکیب شیمیایی می‌باشد. در فصل مشترک ۳۱۶ (شکل (۱۱)) تمرکز فریت در فصل مشترک به خوبی قابل مشاهده است. رشد به صورت غیرمسطح بوده و دانه‌ها به صورت ستونی در فصل مشترک رشد نموده‌اند. همچنین رشد دانه‌های آستنیت در HAZ قابل مشاهده است.

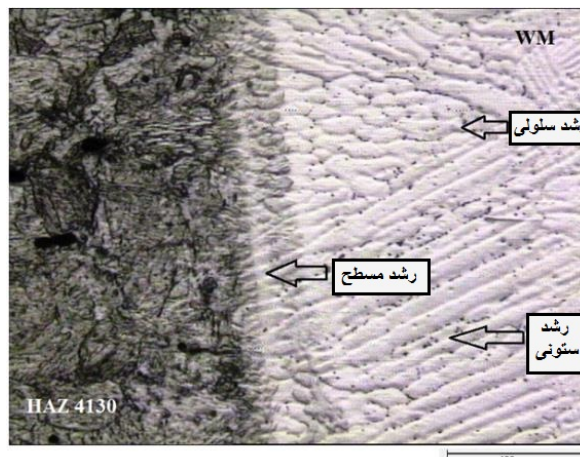
عناصر آلیاژی مختلف به ویژه عناصر آلیاژی نظیر مولیبدن و نیوبیم می‌باشد که ضریب توزیع تعادلی انجامد آنها به اندازه کافی کوچک‌تر از یک است. این عامل سبب ایجاد ریزساختار دندریتی شده و فازهای ثانویه در مناطق بین دندریتی و بین دانه‌ها شکل می‌گیرد. علاوه بر این، اندازه ریزساختارها نیز با یکدیگر یکسان نبوده که این پارامتر بر روی خواص جوش مانند استحکام کششی، چقرمگی و حساسیت به ترک انجمادی تأثیرگذار می‌باشد [۱۴ و ۱۵].

#### ۴-۳- بررسی فصل مشترک جوش

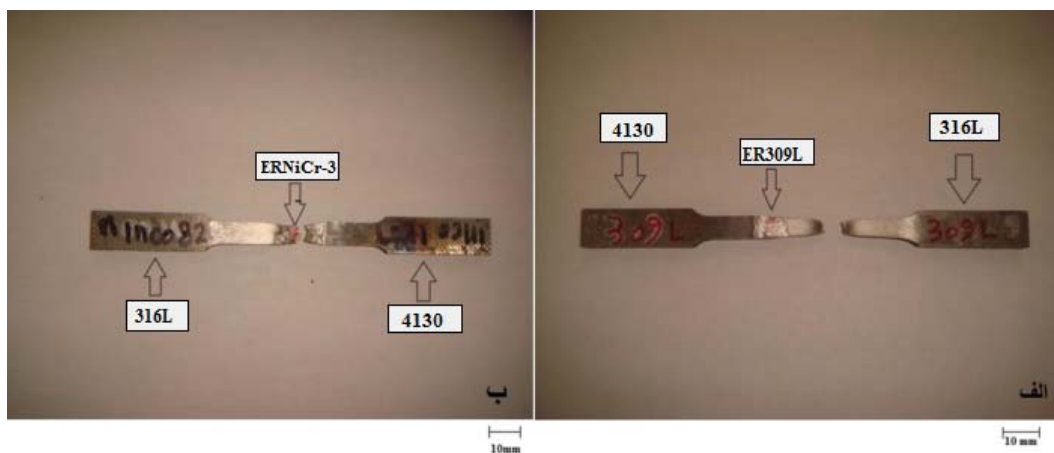
در شکل (۱۰) و (۱۱) فصل مشترک مربوط به نمونه جوش داده



شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فصل مشترک در سمت فولاد ۳۱۶ L، جوشکاری شده توسط ERNiCr-۳



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فصل مشترک در سمت فولاد ۴۱۳۰ AISI، جوشکاری شده توسط ERNiCr-۳



شکل ۱۴- تصاویر از محل شکست در نمونه‌های جوش داده شده به وسیله فلز پرکننده الف) ER۳۰۹L و ب) ERNiCr-۳

زیاد به علت تفاوت زیاد در ترکیب شیمیایی بین فاز پایه و پرکننده ایجاد شده است. رشد به صورت غیرمسطح بوده و دانه‌ها به صورت سلولی در ناحیه ذوب شده رشد نموده‌اند.

### ۳-۵- نتایج آزمون کشش

بررسی نمونه‌های آزمون کشش (شکل ۱۴)) نشان داد که نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER۳۰۹L از فلز پایه ۳۱۶L نیز دچار شکست گردید. بررسی نتایج موجود در جدول ۳ نیز نشان‌دهنده نقطه تسلیم در محدوده ۳۵۰ مگاپاسکال و استحکام نهایی حدود ۶۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه جوشکاری شده با

فصل مشترک نمونه جوش داده شده توسط ERNiCr-۳ در شکل (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. در فصل مشترک سمت ۴۱۳۰ AISI همان‌گونه که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، رشد به صورت مسطح (رونشینی) قابل مشاهده می‌باشد. جوانه‌زنی و رشد به صورت سلولی و ستونی در داخل ناحیه ذوب شده دیده می‌شود و افزایش اندازه ستون‌ها و سلول‌ها در این نمونه نسبت به نمونه جوش داده شده توسط ER۳۰۹L دیده می‌شود. در فصل مشترک ۳۱۶ (شکل ۱۳)) تمرکز فریت در فصل مشترک به خوبی قابل مشاهده است. علاوه بر آن یک ناحیه ترکیب نشده در فصل مشترک دیده می‌شود که به احتمال

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون ضربه و کشش

ER NiCr-۳	ER ۳۰۹L	
~ ۶۵	۱۰۵~	انرژی شکست حاصل از آزمون شارپی (ژول)
~ ۳۷۰	۳۵۰~	استحکام تسلیم آزمون کشش (مگاپاسکال)
~ ۶۱۰	۶۳۰~	استحکام تسلیم آزمون کشش (مگاپاسکال)
۱۰/۵~	۱۷/۵~	تغییر طول نمونه (میلی متر)

نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که از نظر خواص مکانیکی انتخاب فلز پرکننده ER۳۰۹L برای این اتصال به‌علت وجود فریت در ساختار فلز جوش مناسب‌تر بوده و دارای استحکام کافی می‌باشد و اتصال مناسبی ایجاد می‌نماید. با بررسی داده‌های حاصل از آزمون کشش و انرژی شکست در جدول ۳ می‌توان مشاهده نمود چقرمگی شکست در نمونه جوش داده شده توسط فلز پرکننده ER۳۰۹L به میزان قابل توجهی بیشتر از نمونه جوش داده شده توسط فلز پرکننده ERNiCr-۳ می‌باشد. این مسأله را می‌توان به حضور فریت در ساختار جوش فلز پرکننده ER۳۰۹L و ساختار انجمادی نسبتاً متفاوت آن نسبت داد.

### ۳-۶- نتایج آزمون ضربه

در جدول ۳ نتایج آزمون ضربه شارپی برای فلز جوش گزارش شده و نتایج انرژی شکست بالایی به میزان ۱۰۵ ژول را برای فلز پرکننده ER۳۰۹L نشان می‌دهد. این میزان انرژی ضربه نسبت به نمونه جوش داده شده با فلز پرکننده ERNiCr-۳ در حدود ۴۰ ژول بالاتر می‌باشد.

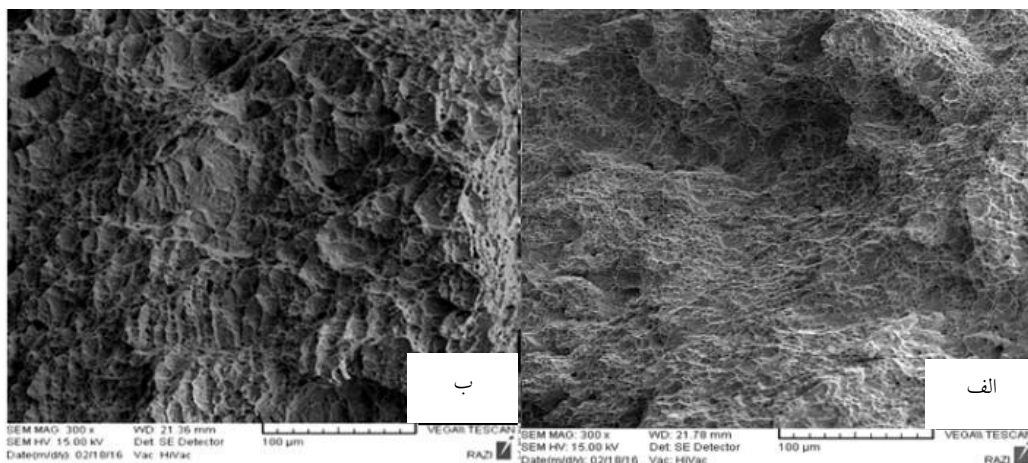
تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به سطح شکست نمونه ضربه ER۳۰۹L مورد بررسی قرار گرفت و در شکل (۱۵) ارائه گردید. در این شکل، خطوط سیلان کاملاً مشخص بوده و حالت پیوسته دارد. مشاهده دیمپل‌ها و حفرات قیفی شکل و کروی در سطح شکست در شکل (۱۵-الف) نشان می‌دهد که نوع شکست در نمونه جوش داده شده با فلز پرکننده ER۳۰۹L کاملاً نرم می‌باشد. در نمونه جوش داده شده با فلز پرکننده ERNiCr-۳ مطابق شکل (۱۵-ب) علاوه بر دیمپل‌ها

فلز پرکننده ERNiCr-۳ مطابق شکل (۱۴) از محل جوش دچار شکست گردید. بررسی نتایج آزمون کشش در جدول ۳ نشان‌دهنده نقطه تسلیم در حدود ۳۷۰ مگاپاسکال و استحکام نهایی در حدود ۶۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. این بدان معناست که ضعیف‌ترین مناطق در قطعات جوشکاری شده، به ترتیب فلز پایه ۳۱۶L و فلز پرکننده ERNiCr-۳ می‌باشد. محل شکست در نمونه‌های جوشکاری شده به استحکام اجزای مختلف نمونه در اتصال بستگی خواهد داشت.

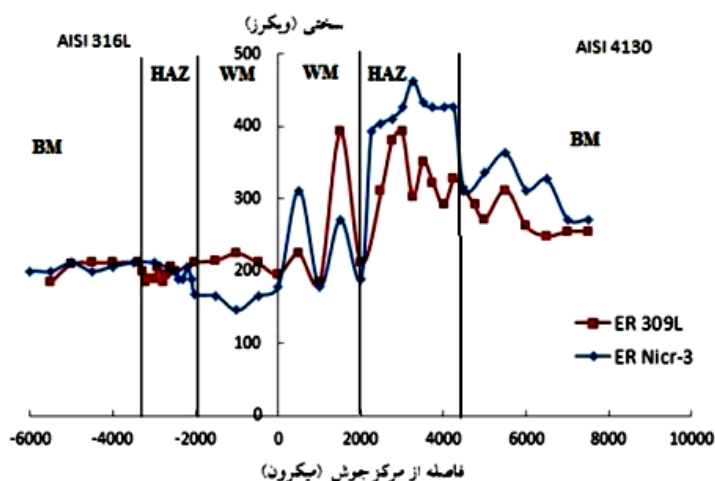
به‌طور معمول فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در شرایط کارسرد، نورد گرم و آنیل شده جوشکاری می‌شوند. در اکثر موارد پس از عملیات جوشکاری، مقداری نرم‌شدگی در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) این نوع فولادها رخ می‌دهد که به تبلور مجدد و رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) مربوط می‌باشد [۴]. این تغییرات در شکل‌های (۱۱) و (۱۳) قابل مشاهده است. در نتیجه زمانی که آزمون کشش بر روی نمونه‌های جوشکاری شده با فلز یا فلزات پایه از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی انجام می‌شود، احتمال شکست نمونه در منطقه HAZ افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر حضور فریت در منطقه HAZ و در نزدیکی مرز ذوب هر دو نمونه مطابق شکل‌های (۱۱) و (۱۳) باعث افزایش استحکام گردیده و یا به‌عبارت دیگر فریت به‌عنوان یک عامل استحکام‌دهنده ثانویه عمل نموده و مقدار استحکام منطقه HAZ را افزایش داده و مانع از شکست نمونه‌ها در منطقه HAZ می‌گردد. این در حالی است که در مواردی که افزایش اندازه دانه‌های آستنیت بدون حضور فریت رخ می‌دهد احتمال شکست در منطقه HAZ زیاد می‌باشد [۴].





شکل ۱۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های جوش داده شده: الف) پرکننده ER۳۰۹L و ب) پرکننده ERNiCr-۳



شکل ۱۶- نمودار تغییرات سختی از فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L تا فلز پایه فولاد کم آلیاژ AISI ۴۱۳۰

و سیم جوش ERNiCr-۳ باعث کاهش سختی شده است. علت این موضوع را می‌توان با در نظر گرفتن تصاویر متالوگرافی شکل (۱۱) و (۱۳) به تفاوت میزان فریت موجود در نمونه‌ها و ساختار آنها نسبت داد.

در سمت فولاد AISI ۴۱۳۰ رفتار یکسانی بر دو نمونه حاکم می‌باشد. در این سمت یک روند افزایش سختی از سمت فلز پایه به سمت منطقه HAZ در هر دو فلز پرکننده مشاهده می‌گردد که این روند با توجه به تغییر ساختار از پرلیت و بینیت به مارتنزیت تمپر شده و بینیت در منطقه HAZ شکل (۱۷) و (۱۸) قابل انتظار می‌باشد. در ادامه در منطقه

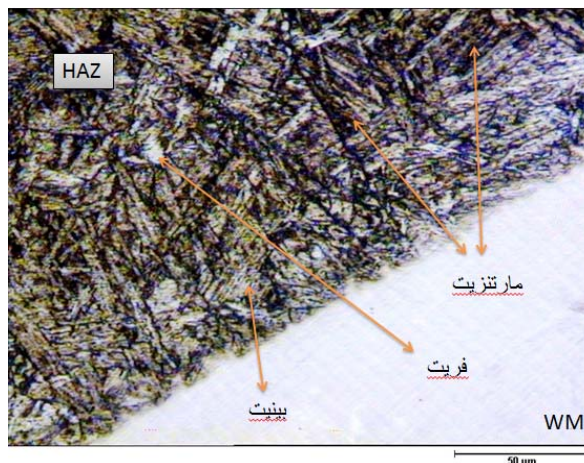
صفحات تورق در نقاطی از نمونه قابل مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده شکست نیمه ترد است.

### ۳-۷- آزمون میکروسختی سنجی

پروفیل سختی معیار مناسبی برای پیش‌بینی ریزساختار تشکیل شده می‌باشد. شکل (۱۶) پروفیل سختی افقی از فلز پایه فولاد AISI ۳۱۶L تا فلز پایه فولاد AISI ۴۱۳۰ را نشان می‌دهد. بررسی نمودار سختی در شکل (۱۶) نشان می‌دهد، دو نمونه در سمت فولاد ۳۱۶، رفتار کاملاً متفاوتی از هم در منطقه جوش از خود نشان می‌دهند. سیم جوش ER۳۰۹L باعث افزایش سختی



شکل ۱۸- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار منطقه HAZ در فولاد ۴۱۳۰، جوشکاری شده توسط ERNiCr-۳



شکل ۱۷- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار منطقه HAZ در فولاد ۴۱۳۰ AISI، جوشکاری شده توسط ER۳۰۹L

- آستنیت بود.
- ۳- آزمون ضربه نشان دهنده وقوع شکست نرم در تمامی نمونه‌ها بود. مقدار انرژی شکست اتصالات در فلز پرکننده ۳۰۹L به میزان قابل ملاحظه‌ای بالاتر از اتصال با ERNiCr-۳ بود که این موضوع به دلیل وجود فریت در ساختار فلز پرکننده ۳۰۹L می‌باشد.
- ۴- نتایج آزمون کشش نشان داد که انتخاب فلز پرکننده ER۳۰۹L برای این اتصال به علت وجود فریت بیشتر در ساختار فلز جوش مناسب بوده و دارای استحکام کافی می‌باشد. چقرمگی شکست در نمونه جوش داده شده توسط فلز پرکننده ER۳۰۹L به میزان قابل توجهی بیشتر از نمونه جوش داده شده توسط فلز پرکننده ERNiCr-۳ بود.
- ۵- حداکثر میزان سختی در هر دو نمونه در منطقه HAZ فولاد ۴۱۳۰ مشاهده شد که این مسأله به علت وجود مارتنزیت تمپر شده و بینیت در این منطقه می‌باشد.

جوش نسبت به فلز پایه ۴۱۳۰ و منطقه HAZ مربوط به آن کاهش سختی مشاهده می‌شود که این موضوع به دلیل ایجاد ساختار با زمینه آستنیتی می‌باشد. بازه تغییرات سختی در نمونه بین ۱۵۰ تا ۴۸۰ ویکرز می‌باشد. حداکثر میزان سختی در هر دو نمونه در منطقه HAZ فولاد ۴۱۳۰ AISI مشاهده می‌شود که این مسأله به علت وجود مارتنزیت تمپر شده در این منطقه می‌باشد (شکل ۱۷ و ۱۸).

#### ۴- نتیجه گیری

- نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان در بخش‌های زیر خلاصه نمود:
- ۱- جوش حاصل از فلز پرکننده اینکونل ۸۲ دارای ریزساختار کاملاً آستنیتی با دانه‌هایی هم‌محور بود و ساختار دندریتی در آن قابل مشاهده بود.
  - ۲- رشد سلولی و دندریتی در فلز جوش ER۳۰۹L همراه با فریت در ساختار مشاهده شد. ریزساختار فلز جوش به صورت زمینه آستنیتی همراه با فریت دلتا در مرز دانه‌های

#### واژه‌نامه

1. electron beam welding (EBW)
2. laser beam welding (LBW)
3. heat affected zone (HAZ)
4. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

1. Kou, S., *Welding Metallurgy*, 2nd ed., Wiley-Interscience, New Jersey, USA, 2003.
2. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S., and Reddy, G. M., "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.
3. Phanindra Reddy, M., Aldrin Sam William, A., Mohan Prashanth, M., Sabaresh Kumar, S. N., Devendranath Ramkumar, K., Arivazhagan, N., and Narayanan, S., "Assessment of Mechanical Properties of AISI 4140 and AISI 316 Dissimilar Weldments", *Procedia Engineering*, Vol. 75, pp. 29-33, 2014.
4. Lippold, J. C., and Kotecki, D. J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stanlees*, John Wiley & Sons Jercey Inc., New Jersey, USA, 2005.
5. *Equinox International Ltd Data Sheet*, Stainless Steel 304H, DIN 1.4948, pp. 12-19.
6. Jang, C., Lee, J., Kim, J. S., and Jin, T. E., "Mechanical Property Variation Within Inconel 82/182 Dissimilar Metal Weld Between Low Alloy Steel and 316 Stainless Steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 635-646, 2008.
7. Kim, J. W., Lee, K., Kim, J. S., and Byun, T. S., "Local Mechanical Properties of Alloy 82/182 Dissimilar Weld Joint Between SA508 Gr.1a and F316 SS at RT and 320C", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 384, pp. 212-221, 2009.
8. Ahmadi, E., and Ebrahimi, A. R., "The Effect of Activating Fluxes on 316L Stainless Steel Weld Joint Characteristic in TIG Welding using the Taguchi Method", *Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 1, pp. 55-62, 2013.
9. Mostaan, H., Shamanian, M., Monirvaghefi, M. P., Behjati, S., Szpunar, J. A., and Sherafati, J., "Electron Beam Assisted Joining of Nanograin-Sized Fe-Co-V Magnetic Foils: Study and Optimization of Magnetic Properties of Weld Joints", *Vacuum*, Vol. 109, pp. 148-156, 2014.
10. Subhash Chander, G., Madhusudhan Reddy, G., and Tagore, G. R. N., "Influence of Process Parameters on Impact Toughness and Hardness of Dissimilar AISI 4140 and AISI 304 Continuous Drive Friction Welds", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 1445-1457, 2013.
11. Özdemir, N., Sarsılmaz, F., and Hasçalık, A., "Effect of Rotational Speed on the Interface Properties of Friction-Welded AISI 304L to 4340 Steel", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 301-307, 2007.
12. White, W. E., and May, W. E., "Metallographic Observations on the Formation and Occurrence of Ferrite, Sigma Phase, and Carbides in Austenitic Stainless Steels: Part I: Studies of AISI Type 310 Stainless Steel", *Metallography*, Vol. 3, No. 1, pp. 35-50, 1970.
۱۳. فراهانی، ا.، شمعانیان، م. و اشرفی زاده، ف.، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشکاری غیرمشابه اینکونل ۶۱۷ به فولاد زنگ ۳۰۴"، مجموعه مقالات پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و جامعه علمی ریخته گری ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.
14. Kington, A. V., and Noble, F. W., "σ Phase Embrittlement of a Type 310 Stainless Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 138, pp. 259-266, 1991.
15. Ul-Hamid, H. A., Tawancy, H., and Nureddin, A. M., "Failure of Weld Joints Between Carbon Steel Pipe and 304 Stainless Steel Elbows", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, pp. 181-191, 2005.
16. Kacar, R., and Baylan, O., "An Investigation of Microstructure Property Relationships in Dissimilar Welds Between Martensitic and Austenitic Stainless Steels", *Materials and Design*, Vol. 25, pp. 317-329, 2004.
17. Sireesha, M., Shankar, V., Albert, Sh. K., and Sundaresan, S., "Microstructural Features of Dissimilar Welds Between 316LN Austenitic Stainless Steel and Alloy 800", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 292, No. 1, pp. 74-82, 2000.