

## Research Paper

# The effect of chemical composition of filler metal on properties of dissimilar joint between AISI316 and AISI430 steels welded by GTAW

Iman Rasouli<sup>1</sup>, \*Mahdi Rafiei<sup>2</sup>

1- Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

**Citation:** Rasouli I, Rafiei M. The effect of chemical composition of filler metal on properties of dissimilar joint between AISI316 and AISI430 steels welded by GTAW. Metallurgical Engineering 2018; 21(1): 54-71 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.75130.1157>

**doi:** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.75130.1157>

## ABSTRACT

In this research, the effect of different filler metals on microstructure and mechanical properties of dissimilar joint between AISI316 and AISI430 stainless steels was studied. For this purpose, GTAW process with ER308L, ER309L and ERNiCrMo4 filler metals with diameter of 2.4 mm were used. Microstructure and fracture surfaces of the welded samples were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and ferritoscopy. Also, the mechanical properties of the joint were evaluated by tension, impact and microhardness tests. The results show that the microstructure in the welded sample with ER308L filler metal was austenitic with lathy and skeletal ferrite and Widmanstatten austenite. In the welded sample with ER309L filler metal the microstructure was composed from austenite with skeletal ferrite and in the welded sample with ERNiCrMo4 filler metal was fully austenitic. In tension test, all samples fractured from AISI430 base metal in a ductile manner. ER309L filler metal indicated low impact energy of about 49 J and ER308L and ERNiCrMo4 filler metals indicated higher impact energy of about 120 and 73 J, respectively. The fracture of the weld metal in the welded samples with ER308L and ERNiCrMo4 filler metals was ductile and in the welded sample with ER309L filler metal was more brittle. The results of microhardness test indicated that ER308L and ERNiCrMo4 filler metals had higher microhardness as compared with ER309L filler metal due to the presence of alloying elements, finer microstructure and higher grain boundaries.

**Keywords:** Dissimilar joint, AISI430 ferritic stainless steel, AISI316 austenitic stainless steel, Mechanical properties, Microstructure.

■ ..... ■

\* **Corresponding Author:**

**Mahdi Rafiei, PhD**

**Address:** Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

**Tel:** +98 (31) 42292629

**E-mail:** m.rafiee@pmt.iaun.ac.ir

## تأثیر ترکیب شیمیایی فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد AISI316 به فولاد AISI430 جوشکاری شده توسط روش GTAW

 ایمان رسولی<sup>۱</sup>، مهدی رفیعی<sup>۲</sup>

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

### چکیده

در این پژوهش اثر فلزات پرکننده مختلف بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 به فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 بررسی شد. بدین منظور از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و فلزات پرکننده ER309L، ER308L و ERNiCrMo4 با قطر ۲/۴ میلی‌متر استفاده شد. جهت بررسی ریزساختار و مقاطع شکست نمونه‌های جوشکاری شده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، آنالیز طیف‌نگاری توزیع انرژی (EDS) و آزمون فریت سنجی استفاده شد. جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال، از آزمون‌های کشش، ضربه و ریزسختی سنجی استفاده گردید. نتایج نشان داد که ریزساختار در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER308L آستنیتی همراه با فریت شبکه‌ای، فریت کرمی شکل و آستنیت ویدمن اشتاتن، در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L آستنیتی همراه با فریت اسکلتی و در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCrMo4 کاملاً آستنیتی بود. در آزمون کشش تمامی نمونه‌ها از فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 و به‌صورت نرم دچار شکست شدند. فلز جوش ER309L انرژی ضربه پایین در حدود ۴۹ ژول و فلزات جوش ER308L و ERNiCrMo4 انرژی ضربه بالا به ترتیب در حدود ۱۲۰ و ۲۳ ژول نشان دادند. شکست فلز جوش در دو نمونه ER308L و ERNiCrMo4 از نوع نرم و در نمونه ER309L نسبت به دو نمونه دیگر تردتر بود. نتایج ریزسختی سنجی نشان داد سختی فلز جوش در نمونه‌های ER308L و ERNiCrMo4 به دلیل ساختار درون دانه‌ای ریز و افزایش مرز دانه‌ها و همچنین عناصر آلیاژی بیشتر موجود در فلز جوش ERNiCrMo4 بالاتر از نمونه ER309L می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** اتصال غیرمشابه، فولاد زنگ نزن فریتی AISI430، فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316، خواص مکانیکی، ریزساختار.

### ۱. مقدمه

فولادهای زنگ نزن گروه مهمی از مواد مهندسی می‌باشند که با توجه به خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خوب خود، به‌طور گسترده‌ای در صنایع و محیط‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی با توجه به خواص بسیار عالی خود از جمله مقاومت در برابر خوردگی، شکل‌پذیری، چقرمگی و جوش‌پذیری، ارائه‌دهنده یکی از بزرگ‌ترین گروه‌های فولادهای زنگ نزن می‌باشند. فولاد زنگ نزن به فولادهایی با مقدار عناصر آلیاژی بالا گفته می‌شود که توانایی مقاومت به خوردگی در اتمسفرهای خورنده و دماهای بالا را داشته باشند. فولادهای زنگ نزن معمولی حاوی حداقل ۱۱ درصد کروم هستند که عامل اصلی مقاومت به خوردگی آن‌هاست [۱]. فولادهای زنگ نزن بر مبنای عنصر آلیاژی که به آن افزوده شده است به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

آلیاژهای آهن- کروم  
 آلیاژهای آهن- کروم - کربن  
 آلیاژهای آهن- کروم - نیکل - کربن  
 همچنین فولادهای زنگ نزن بر اساس ساختار متالورژیکی و ترکیب شیمیایی، به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

فولادهای زنگ نزن فریتی  
 فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی<sup>۱</sup>  
 فولادهای زنگ نزن آستنیتی  
 فولادهای زنگ نزن آستنیتی - فریتی (دوفازی)<sup>۲</sup>  
 فولادهای زنگ نزن رسوب سختی [۲]

چهار دسته نخست توسط فازهای متالورژیکی شناخته می‌شوند. فولادهای فریتی یا آستنیتی حاوی مقادیر زیادی از فازهای فریت و آستنیت هستند. فولادهای دوفازی حاوی هر دو فاز فریت و آستنیت می‌باشند. پنجمین گروه فولادهای

1. Martensitic Stainless Steels
2. Duplex

\* نویسنده مسئول:  
 دکتر مهدی رفیعی

نشانی: نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته.  
 تلفن: ۴۲۲۹۲۶۲۹ (۳۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: m.rafeei@pmt.iaun.ac.ir

دارد. از این رو با رشد دسترسی به مواد جدید، صنایع، امروزه از گستره متنوعی از مواد جهت ساخت محصولات خود در مقیاس صنعتی با نگاهی به بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها، استفاده می‌کنند. از میان اتصالات متنوع، تقاضا برای استفاده از اتصالات فریتی/آستنیتی (F/A) در صنایع تولید برق (نیروگاهی)، شیمیایی، پتروشیمی، هسته‌ای و خودروسازی زیاد است. بنابراین اتصالات F/A از میان اتصالات غیرمشابه از جمله مواردی هستند که دارای کاربردهای وسیع صنعتی از نظر حجم تولید می‌باشند. این موضوع نهایتاً منجر به افزایش تقاضا برای روش‌هایی جهت جوشکاری این مواد غیرمشابه و استفاده از آن‌ها در مقیاس صنعتی می‌گردد. مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن فریتی مثل فولادهای زنگ نزن نیکل دار بوده اما ارزان‌تر هستند، زیرا در ترکیبشان نیکل وجود ندارد اما با این وجود فولادهای زنگ نزن فریتی نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی کاربرد محدودتری دارند، که این به دلیل شکل‌پذیری محدود آن‌ها می‌باشد. برای غلبه بر مشکل شکل‌پذیر نبودن فولادهای زنگ نزن فریتی، فولادهای فریتی جدید با مقدار کربن و نیتروژن کم به صورت تجاری ساخته شده‌اند. فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون در دمای بالا و جوش‌پذیری مطلوبی دارد. فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ در صنایع مختلفی همچون نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع غذایی، دارویی و ... مصارف گوناگون دارد. این فولاد مقاومت به خوردگی و شکل‌پذیری مطلوبی دارد. فولادهای زنگ نزن آستنیتی به سادگی قابل جوشکاری می‌باشند. ایجاد اتصال بین فلزات غیرمشابه به‌طور کلی چالش برانگیزتر نسبت به فلزات مشابه است، زیرا خواص فیزیکی، مکانیکی و متالورژیکی فلزات پایه متفاوت است. مسئله اصلی در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی به یکدیگر اختلاف در ضریب انبساط حرارتی می‌باشد که می‌تواند منجر به تشکیل ترک در فصل مشترک اتصال گردد [۹].

در این راستا تحقیقات متعددی روی اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ نزن آستنیتی به فولادهای زنگ نزن فریتی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال آلبرت<sup>۳</sup> [۱۰] و همکارانش به بررسی تأثیر ترکیب فلز جوش بر ریزساختار و چقرمگی فلز جوش پرداختند. اتصالات جوش مشابه بین فولادهای فریتی-مارتنزیتی، همچنین اتصالات جوش غیرمشابه بین فولاد فریتی-مارتنزیتی و فولاد زنگ نزن آستنیتی 316(N)، با استفاده از فرآیند جوشکاری پرتوی الکترونی (EBW)<sup>۴</sup> انجام شد. در اتصال جوش مشابه، فولاد فریتی-مارتنزیتی حاوی ۱ تا ۱/۴ درصد وزنی تنگستن و در اتصال جوش غیرمشابه، فولاد فریتی-مارتنزیتی حاوی ۱ درصد وزن تنگستن بود. مشاهدات ریزساختاری نشان داد فریت دلتا در فلز جوش

زنگ نزن آن‌هایی هستند که می‌توان با عملیات حرارتی پیرسازی استحکام آن‌ها را افزایش داد [۳ و ۴]. فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای پایه آهنی با مقدار ۵۵ تا ۸۸ درصد وزنی آهن می‌باشند. عناصر اصلی که به فولادهای زنگ نزن فریتی اضافه می‌شوند کروم و کربن هستند. اساساً تمام فولادهای زنگ نزن به‌طور خودبه‌خود حاوی مقداری منگنز و سیلیسیم هستند. عناصر آلیاژی دیگر عبارت‌اند از: مولیبدن، تیتانیوم، آلومینیوم، مس، تنگستن و نیتروژن که برای بهبود قابلیت ساخت، بهبود خواص ویژه، افزایش مقاومت به خوردگی و بهبود ریزساختار اضافه می‌شوند [۵]. افزودن نیکل به فولادهای زنگ نزن مقاومت به خوردگی را در محیط‌های خنثی و یا اکسیدکننده ضعیف بهبود می‌بخشد، اما قیمت آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین مقدار کافی نیکل قابلیت انعطاف و شکل‌پذیری فولادها را افزایش می‌دهد، زیرا امکان پایداری آستنیت در دمای محیط را میسر می‌سازد. افزودن مولیبدن به فولادهای زنگ نزن مقاومت به خوردگی را در حضور یون کلر افزایش می‌دهد، حال آن‌که افزایش آلومینیوم مقاومت به پوسته‌شدن را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد. کروم نیز برای افزایش مقاومت به خوردگی، اضافه می‌شود [۶].

گرید AISI 316 یک فولاد زنگ نزن آستنیتی با مقدار کربن کم و مقدار مولیبدن زیاد است که طیف گسترده‌ای از کاربرد در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، دریایی، هسته‌ای و همچنین در ایمپلنت‌های اورتوپدی در زمینه زیست پزشکی را به خود اختصاص داده است. همچنین فولادهای زنگ نزن فریتی با ۱۱ تا ۱۲ درصد وزنی کروم، فولادهایی باقیمت پایین می‌باشند. علاوه بر این، فولادهای زنگ نزن فریتی، فولادهایی تجارتي محسوب می‌شوند. حضور سایر عناصر چه به صورت عمدی اضافه شوند و چه به صورت ناخالصی، می‌تواند به‌طور مؤثری بر ریزساختار فولادهای زنگ نزن فریتی تأثیرگذار باشد. نیتروژن معمولاً به‌عنوان یک ناخالصی در نظر گرفته می‌شود و پایدارکننده فاز آستنیت است؛ بنابراین کاهش کربن و نیتروژن تا مقادیر بسیار کم (کمتر از ۱۰۰ ppm) برای ابقاء یک ساختار عمدتاً فریتی در فولادهای کم و متوسط کروم، لازم است. تیتانیوم و نیوبیوم به خاطر میل ترکیبی شدید با کربن و نیتروژن در مقادیر اندک، بسیار مفید هستند. آلومینیوم نیز برای بهبود مقاومت در برابر اکسیداسیون، به‌ویژه در دماهای بالا افزوده می‌شود. مولیبدن نیز به برخی از فولادهای زنگ نزن فریتی برای افزایش مقاومت به خوردگی، به‌ویژه در زمینه خوردگی حفره‌ای اضافه می‌شود. نیکل و مس به‌طور معمول به فولادهای زنگ نزن فریتی اضافه نمی‌شوند، اگرچه مقادیر اندک نیکل ممکن است در بهبود چقرمگی شکست مؤثر باشد [۷ و ۸].

این نوع فولاد مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون در دمای بالا، جوش‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی خوبی

3. Albert

4. Electron Beam Welding

به‌وسیله حرارت ورودی متوسط و پایین نشان داد. در کل فلز جوش ۳۰۸L مقادیر بالاتر از تیغه‌های مارتنزیت و چقرمگی را نسبت به فلز جوش ۳۱۶L ایجاد کرد.

چن<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۱۴] به بررسی اتصال غیرمشابه به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی نقطه‌ای (FSSW)<sup>۱۱</sup> بین فولاد زنگ نزن ۴۳۰ و فولاد فریتی تقویت شده با نانوساختارهای اکسیدی پراکنده‌شده، تحت تابش یون دوگانه  $Fe^+/He^+$  پرداختند. تخریب ناشی از تابش این یون‌ها باعث افت خواص مکانیکی به‌ویژه در مناطق جوشکاری شده گردید. اثر تابش در مناطق مختلف اتصال به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)<sup>۱۲</sup> و نانوسختی سنجی مورد بررسی قرار گرفت. تابش این یون‌ها باعث افزایش سختی در تمامی مناطق جوش گردید.

ژانگ<sup>۱۳</sup> و همکارانش [۱۵] تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری روی خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L و فولاد مارتنزیتی با اکتیواسیون بالا<sup>۱۴</sup> را مورد بررسی قرار دادند. جوشکاری توسط فرآیند GTAW با فلز پرکننده نوع ۳۰۹ انجام شد. به‌منظور پایدار کردن ریزساختار و بهبود استحکام و چقرمگی، عملیات PWHT به‌صورت تمپر کردن در دماهای ۷۴۰، ۷۸۰ و ۸۲۰ سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت انجام شد. مشاهدات ریزساختاری نشان داد که تمپر کردن در دمای ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، حالت بهینه عملیات PWHT در این تحقیق است. سخت شدن در ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) روی سمت فولاد مارتنزیتی کاهش یافت. استحکام کششی اتصال، مشابه فلز پایه بود. چقرمگی ضربه در ناحیه HAZ روی فولاد مارتنزیتی برابر ۷۷٪ فلز پایه بود. انرژی جذب شده از ناحیه HAZ در سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L تا ۹۳ ژول کاهش یافت و مقدار آن در فلز جوش پس از عملیات برابر ۱۱۰ ژول به دست آمد.

با توجه به مطالب عنوان‌شده، مشخص شد که پژوهشی در زمینه تأثیر ترکیب شیمیایی فلزات جوش مختلف بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 انجام نشده است و با توجه به اینکه این اتصال در صنایع نفت، گاز و خودروسازی کاربرد دارد و اتصالات آن از اهمیت بالایی برخوردار است، لذا در این پژوهش به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 به فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 ایجادشده توسط فرآیند جوشکاری GTAW با فلزات پرکننده ER308L، ER309L و ERNiCrMo4 پرداخته شده است.

حاوی ۱/۴ درصد وزنی تنگستن وجود دارد، درحالی‌که در فلز جوش حاوی ۱ درصد وزنی تنگستن، فریت دلتا وجود ندارد. همچنین در حالت جوش غیرمشابه، ریزساختار نشان‌دهنده حضور مارتنزیت تیغه‌ای و آستنیت باقی‌مانده بود. آستنیت حتی پس از عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT)<sup>۱۵</sup>، پایدار بود و حضور آن به مقدار بالای نیکل در محدوده ۵ و ۶ درصد وزنی، در فلز جوش غیرمشابه نسبت داده شد.

خان<sup>۱۶</sup> و همکارانش [۱۱] به بررسی جوشکاری پرتو لیزر جهت ایجاد اتصال بین فولادهای زنگ نزن فریتی غیرمشابه AISI430L و AISI440L پرداختند. عملیات‌های قبل و بعد از جوشکاری با موفقیت جهت اجتناب از تشکیل ریزترک انجام شد. همچنین به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر روی هندسه مهره جوش پرداختند و سعی در دستیابی به اتصال بهینه داشتند. توان لیزر در محدوده ۷۹۰ تا ۱۰۸ وات و سرعت جوشکاری ۴ تا ۶/۳ متر بر دقیقه و زاویه برخورد پرتو در حدود ۱۵ درجه، پارامترهای بهینه بودند که یک قطعه جوشکاری شده عالی را ارائه می‌دادند.

در تحقیقی دیگر ساتیانارایانا<sup>۱۷</sup> و همکارانش [۱۲] فرآیند جوشکاری اصطکاکی را برای اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI304L و فولاد زنگ نزن فریتی AISI430L مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. بهینه‌سازی پارامترها، ارتباط خواص ریزساختاری، مکانیکی و رفتار شکست، بخش اصلی این تحقیق بود. جوش‌های بی‌عیب تنها در ترکیبی از پارامترهای مشخص جوشکاری به دست آمد. ارزیابی اتصالات برای مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای با جوش فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی مقایسه شد. فصل مشترک در مجاورت فولاد زنگ نزن آستنیتی دارای تنش پسماند بیشتر به علت جریان تنشی بالاتر و ضریب انبساط حرارتی بیشتر آن بود.

مخرجی<sup>۱۸</sup> و همکارانش [۱۳] تأثیر حرارت ورودی روی تشکیل مارتنزیت و خواص ضربه ورق‌های فولاد زنگ نزن فریتی 409M، با ضخامت ۴ میلی‌متر، جوشکاری شده به روش GTAW<sup>۱۹</sup> را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. اتصالات جوشکاری شده تحت سه حرارت ورودی ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ کیلوژول بر میلی‌متر، با استفاده از دو فلز پرکننده آستنیتی متفاوت 308L و 316L و ترکیب گاز محافظ Ar+5%CO2 انجام شد. ریزساختار و چقرمگی شکست اتصال توسط آزمون ضربه شارپی ارزیابی شد. مشخص گردید که ریزساختار و خواص ضربه فلز جوش به‌طور چشمگیر به‌وسیله حرارت ورودی و نوع فلز پرکننده تحت تأثیر قرار می‌گیرد. فلز جوش ایجادشده به‌وسیله حرارت ورودی بالاتر، مقادیر بالاتری از تیغه‌های مارتنزیت و چقرمگی را در مقایسه با جوش ایجادشده

10. Chen

11. Friction Stir Spot Welding

12. Transmission Electron Microscope

13. Zhang

14. China Low Activation Martensitic

5. Post Weld Heat Treatment

6. Khan

7. Satyanarayana

8. Mukherjee

9. Gas Tungsten Arc Welding

**جدول ۱.** ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده براساس درصد وزنی

عناصر فولاد	Cr	Ni	Mo	Mn	V	S	P	Si	C	Cu	N	Fe
AISI430	۱۶/۵	۰/۷۵	۰/۰۵۸	۱	۰/۱۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۱/۰۴	۰/۱۲	۰/۱۱۵	-	پایه
AISI316	۱۵/۷	۹/۵	۱/۹۱	۱/۷۸	۰/۲۴۲	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۰/۷۵	۰/۰۸	۰/۲۳۴	۰/۱۰	پایه
ER308L	۱۹/۸۵	۹/۰۸	۰/۰۵	۱/۸۶	-	۰/۰۰۲	۰/۰۲۳	۰/۴۳	۰/۰۱۳	۰/۰۷	-	پایه
ER309L	۲۳/۲۸	۱۳/۵	۰/۷۵	۲/۲	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۶	۰/۰۳	۰/۵	-	پایه
ERNiCrMo4	۱۶/۵	پایه	۱۷	۱	۰/۳	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۵	-	۷

**جدول ۲.** پارامترهای جوشکاری در پاس‌های مختلف

پاس	پارامتر جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت دست جوشکار (mm/s)	حرارت ورودی (kJ/mm)	حرارت ورودی کل (kJ/mm)
پاس ریشه	۱۰۰	۱۲	۰/۷۵	۱/۱۲	۸/۰۶۴
پاس پرکن	۱۵۰	۱۲	۰/۴۵	۲/۸	
پاس رویه	۱۲۰	۱۲	۰/۷۵	۱/۳۴۴	
پاس پشتی	۱۵۰	۱۲	۰/۴۵	۲/۸	

**جدول ۳.** نامگذاری نمونه‌های جوشکاری شده با فلزات پرکننده متفاوت

نوع فلز پرکننده استفاده شده	کد نمونه
ER308L	A
ER309L	B
ERNiCrMo4	C

## ۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فلزات پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 و فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 و فلزات پرکننده ER308L، ER309L و ERNiCrMo4 با ترکیبات شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد.

فلزات پایه مورد استفاده به حالت ورق و با ضخامت ۶ میلی‌متر بودند. با توجه به ضخامت، جنس مواد و طرح اتصال‌های پیشنهادی منابع، از طرح اتصال V یک طرفه با زاویه پخ ۶۰ درجه، درز اتصال ۲ mm و پاشنه اتصال ۱/۵ mm استفاده شد. آماده سازی نمونه‌ها توسط دستگاه فرز با استفاده از خنک‌کننده آب و صابون، جهت جلوگیری از تحولات ریزساختاری نمونه‌ها، باکیفیت بالا انجام شد. سپس مراحل سنباده‌زنی، چربی زدایی و تمیزکاری قطعات جهت انجام فرآیند جوشکاری انجام شد.

اتصال ورق‌ها با استفاده از فلزات پرکننده ER308L، ER309L و ERNiCrMo4 با قطر ۲/۴ میلی‌متر و با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) انجام شد. به این منظور دستورالعمل جوشکاری (WPS)<sup>۱۵</sup> طبق استاندارد

ASME<sup>۱۶</sup> بخش نهم برای هر کدام از فلزات پرکننده تنظیم شد. جریان DCEN<sup>۱۷</sup>، دمای پیشگرم برای فولاد زنگ نزن فریتی AISI430، ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای بین پاسی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. حداکثر دمای بین پاسی توسط گج حرارتی<sup>۱۸</sup> و ترموکوپل لیزری، در فاصله ۱/۵ سانتی‌متر از هر سمت از اتصال جوش داده شد، کنترل شد. همچنین اتصال به وسیله گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ محافظت شد. در هر پاس مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه‌گیری شد و حرارت ورودی جوشکاری توسط فرمول  $Q = \eta(VI/1000S)$  برحسب kJ/mm محاسبه شد. در این فرمول V ولتاژ برحسب ولت، I میزان جریان برحسب آمپر، S سرعت حرکت دست جوشکار برحسب میلی‌متر بر ثانیه و  $\eta$  راندمان حرارتی برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است. مشخصات پارامترهای جوشکاری در جدول (۲) ارائه شده است. نهایتاً پس از اتمام جوشکاری، نمونه‌های جوشکاری شده توسط سه فلز پرکننده، مطابق جدول (۳) نامگذاری شدند.

16. American Society of Mechanical Engineers

17. Direct Current Electrode Positive

18. Tempil Stick

15. Welding Procedure Specification

ریزسختی سنجی ویکرز روی نمونه‌ها و در راستای عمودی و افقی روی فلز جوش مطابق با استاندارد ASTM-۹۲ انجام گردید. تصاویر سطح مقطع شکست نمونه‌های آزمون کشش و ضربه به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی، از مناطق مختلف تهیه شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### بررسی‌های ریزساختاری

به‌طور کلی، در فلزات جوش حاصل از فلزات پرکننده آستنیتی، چهار نوع انجماد و استحاله حالت جامد امکان‌پذیر است. این واکنش‌ها مربوط به نمودار فازی آهن-کروم-نیکل هستند. شیوه‌های انجماد A و AF مربوط به انجمادهایی است که به‌صورت آستنیت اولیه رخ می‌دهد، به‌طوری‌که آستنیت اولین فازی است که در طی انجماد تشکیل می‌شود.

انواع انجماد FA و F دارای فاز فریت دلتای اولیه هستند. در ادامه انجماد نوع FA و F به خاطر ناپایداری فریت در دماهای پایین‌تر، تغییرات ریزساختاری دیگری نیز رخ می‌دهد. همچنین در جوشکاری ذوبی اتصالات غیرمشابه، مهم‌ترین مسئله ترکیب شیمیایی و خواص فلز جوش است. ترکیب شیمیایی فلز جوش به ترکیب شیمیایی فلزات پایه، فلز پرکننده (در صورت استفاده) و درجه رقت بستگی دارد. ترکیب فلز جوش به‌خصوص در جوش‌های چند پاسه یکنواخت نبوده و شیب ترکیب شیمیایی در فلز جوش مجاور هر یک از فلزات پایه، مشاهده می‌شود [۱۶ و ۱۷].

جداول ۴ و ۵ به ترتیب درصد وزنی عناصر فلز جوش و میزان رقت در هر سه نمونه جوشکاری شد را ارائه می‌دهد. میزان رقت در نمونه‌های جوش A و B بر اساس فرمول (۱) و در نمونه جوش C بر اساس فرمول (۲) محاسبه شد و گزارش گردید.

معادله ۱.

$$\%Cr_{WM} = \%Cr_{BM1} \left( \frac{D}{2} \right) + \%Cr_{BM2} \left( \frac{D}{2} \right) + \%Cr_E (1-D)$$

معادله ۲.

$$\%Ni_{WM} = \%Ni_{BM1} \left( \frac{D}{2} \right) + \%Ni_{BM2} \left( \frac{D}{2} \right) + \%Ni_E (1-D)$$

به‌منظور بررسی‌های ریزساختاری از نمونه‌های جوشکاری شده مقاطعی تهیه شد که تمامی نقاط از جمله فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت را شامل شود. قسمت‌های ابتدایی و انتهایی خط جوش در هر کدام از نمونه‌ها به اندازه ۲۰ میلی‌متر بریده شد و از آن‌ها نمونه‌ای جهت انجام آزمون تهیه نشد، چرا که احتمال وجود عیوب در این نواحی از خط جوش بسیار بالا می‌باشد. سپس نمونه‌ها با سنباده ۶۰ تا ۳۰۰۰ آماده سازی شد و در نهایت پولیش به‌وسیله خمیر الماسه با ذرات ۲۰ میکرون و پس از آن توسط خمیر الماسه با ذرات ۱ میکرون انجام شد. سپس به‌منظور مشاهده فازهای موجود در فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 از محلول اچ ماربل (۱۰ گرم  $CuSO_4 + 50$  میلی‌لیتر  $HCl + 50$  میلی‌لیتر  $H_2O$ ) استفاده شد. همچنین به‌منظور مشاهده فازهای موجود در فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316، از الکترواچ با محلول اچ نایتال ۵٪ و با مقدار ولتاژ ۳ ولت و زمان غوطه‌وری ۴۰ ثانیه استفاده شد. تجهیزاتی که در این تحقیق برای بررسی ریزساختار و سطح شکست مورد استفاده قرار گرفت، شامل میکروسکوپ نوری MEIJI TECHNO IM7200 ساخت کشور ژاپن و میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 435VP مجهز به آنالیز طیف‌نگاری توزیع انرژی اشعه ایکس بودند. جهت تعیین ترکیب شیمیایی فلزات جوش مختلف از آزمون کوانتومتری استفاده گردید.

همچنین به‌منظور تعیین خواص مکانیکی آزمون‌هایی انجام شد که شامل ریزسختی سنجی، آزمون ضربه شارپی و آزمون کشش بودند. آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه کشش INSTRON4486 ساخت کشور انگلیس انجام شد. نمونه‌های کشش به‌صورت عرضی تهیه شدند. جهت تعیین میزان انرژی ضربه از آزمون ضربه شارپی استفاده شد. بدین صورت که از فلز جوش، طبق استاندارد ASTM E2300 نمونه‌هایی با ابعاد  $6 \times 10 \times 55$  میلی‌متر مکعب آماده شد و فلز جوش درست در مرکز نمونه قرار گرفت. شیاری به عمق ۲ میلی‌متر و زاویه ۴۵ درجه روی نمونه و در فلز جوش ایجاد شد. از هر اتصال سه نمونه برای انجام این آزمون تهیه و این آزمون توسط دستگاه SIT300 در دمای محیط انجام شد. آزمون‌های کشش و ضربه جهت اطمینان از صحت نتایج ۳ مرتبه روی هر نمونه انجام شدند و میانگین نتایج ارائه گردیدند. همچنین

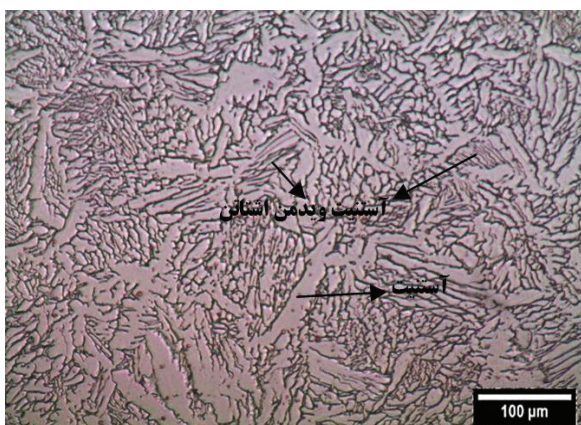
جدول ۴. ترکیب شیمیایی فلزات جوش نمونه‌های جوش کاری شده بر حسب درصد وزنی

W (Ave)	V (Ave)	Ti (Ave)	Nb (Ave)	Cu (Ave)	Co (Ave)	Al (Ave)	Ni (Ave)	Mo (Ave)	Cr (Ave)	S (Ave)	P (Ave)	Mn (Ave)	Si (Ave)	C (Ave)	Fe (Ave)	عناصر نمونه
<۰/۰۲۰	۰/۱۲۸	۰/۰۶۴	<۰/۰۰۲۰	۰/۲۵۲	۰/۰۹۹	۰/۱۱۷	۷/۷۳	۰/۴۸۸	۱۸/۷	۰/۰۰۸	<۰/۰۰۳۰	۱/۸۲	۰/۵۲۹	۰/۰۶۱	۶۹/۹	A
<۰/۰۲۰	۰/۰۹۷۶	۰/۱۴۳	<۰/۰۰۲۰	۰/۱۲۱	۰/۰۴۲۷	۰/۱۵۷	۹/۲۷	۰/۲۸۰	۲۱/۴	<۰/۰۰۵۰	<۰/۰۰۳۰	۱/۷۲	۰/۶۵۹	۰/۰۶۹	۶۵/۸	B
۲/۶۹	۰/۰۹۲۷	۰/۰۸۶۰	۰/۱۱۲	۰/۰۶۲۵	۰/۰۷۸۲	۰/۲۳۶	۴/۰۳	<۵/۵۰	۱۷/۷	۰/۰۱۰۰	<۰/۰۰۳۰	۰/۵۵۶	۰/۲۶۶	۰/۱۰۸	۲۶/۰	C

نسبت به ترک گرم مقاوم نیست و حضور مقادیری فریت (۵ تا ۱۰ درصد حجمی) باعث ایجاد مقاومت به ترک گرم می‌شود. شکل ۲ (الف و ب) ریزساختار فلز جوش نمونه A را در دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد.



الف



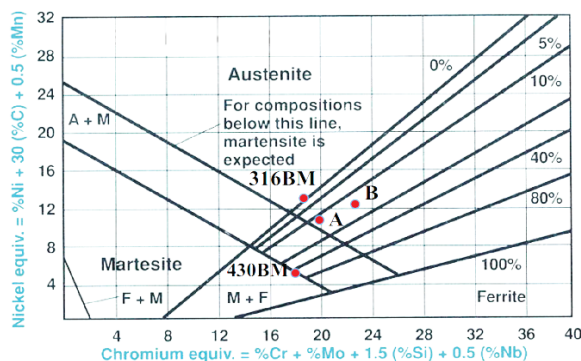
ب

شکل ۲. ریزساختار فلز جوش نمونه A در دو بزرگنمایی متفاوت.

همان‌طور که در شکل ۲ (الف و ب) مشخص است، با توجه به مقدار  $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$  (۱/۹۱٪) در نمودار فازی Fe-Cr-Ni، انجماد در فلز جوش حاصل از فلز پرکننده ER308L، در پاس رویه (بالای تصویر) به صورت FA می‌باشد و مورفولوژی فریت کرمی شکل در این پاس از جوش قابل مشاهده می‌باشد. نمودار شیفلر هم برای این نمونه چنین ساختاری را پیش‌بینی کرده بود. همچنین انجماد در پاس‌های زیری (پایین تصویر) از نوع FA و در برخی مناطق از نوع F می‌باشد. در پاس‌های زیرین فلز جوش، به دلیل افزایش نسبت کروم به نیکل معادل و عدد فریت، ساختار فلز جوش تغییر کرده است و مورفولوژی فریت شبکه‌ای و آستنیت ویدمن اشتاتن در این پاس‌ها قابل مشاهده است. مورفولوژی فریت شبکه‌ای زمانی ایجاد می‌شود که مقادیر  $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$  در محدوده FA زیاد باشد [۱۸].

جدول ۵. میزان رقت محاسبه‌شده در فلزات جوش مختلف

نمونه	میزان رقت (%)
A	۳۱
B	۲۶
C	۳۳



شکل ۱. جایگاه فلزات پایه و جوش مختلف در نمودار شیفلر

ضمناً در محاسبه میزان رقت فرض شد که رقت هر دو فلز پایه یکسان است.

بر اساس داده‌های موجود در جدول ۴ و روابط مربوط به نیکل و کروم معادل (روابط (۳) و (۴)) جایگاه فلزات پایه و فلزات جوش در هر سه نمونه جوشکاری شده در نمودار شیفلر مشخص شد (شکل ۱).

معادله ۳.

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

معادله ۴.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb$$

شکل ۱ جایگاه فلزات پایه و جوش مختلف را در نمودار شیفلر نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل ۱ کاملاً مشخص است فلز پایه ۳۱۶ در مرز میان ناحیه آستنیت و فریت قرار گرفته است، در حالی که فلز پایه ۴۳۰ در ناحیه مارتنزیت و فریت قرار گرفته است. همچنین فلزات جوش نمونه‌های A و B در ناحیه دوفازی آستنیت و فریت، با مقدار فریت حدود ۱۰ درصد قرار گرفته‌اند. چنین ساختار دوفازی در فلز جوش فولادهای زنگ نزن آستنیتی بسیار مطلوب است و احتمال بروز ترک گرم در حین جوشکاری را کاهش می‌دهد. همچنین جایگاه فلز جوش نمونه C به دلیل مقدار نیکل معادل بسیار بالا (در حدود ۴۲ درصد) روی نمودار شیفلر قابل نمایش نبود، ولی به‌رحال می‌توان گفت که با ادامه محوره‌های نمودار شیفلر در ناحیه تکفاز آستنیت قرار می‌گیرد. فاز آستنیت به‌تنهایی

می‌کند. این واکنش در طول ناحیه سه فازی مثلی نمودار فازی Fe-Cr-Ni رخ می‌دهد [۱۶].

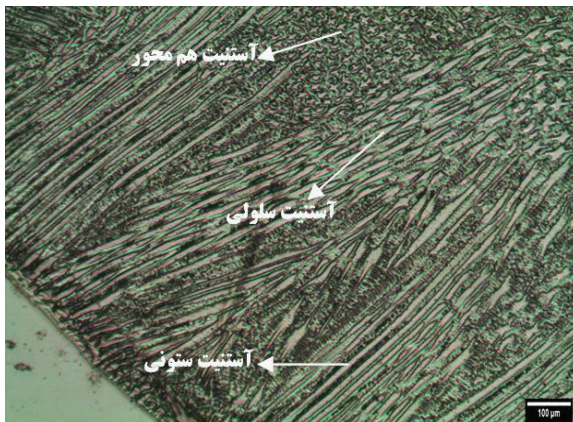
با افزایش مقادیر  $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$  در محدوده انجماد FA مورفولوژی فریت شبکه‌ای ایجاد می‌شود. اما زمانی که نسبت  $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$  کاهش یابد (در محدوده FA)، مورفولوژی فریت کرمی شکل یا اسکلتی ایجاد می‌شود. این نوع مورفولوژی در ریزساختار فلز جوش ER309L (شکل ۳ الف و ب) قابل مشاهده است. این امر در نتیجه توسعه آستنیت است که باعث کاهش میزان فریت می‌شود. این موضوع تا زمانی اتفاق می‌افتد که فریت به قدر کافی از عناصر فریت زا (کروم و مولیبدن) غنی و از عناصر آستنیت زا (نیکل، کربن و نیتروژن) تهی شود. اما مورفولوژی فریت شبکه‌ای به دلیل محدودیت نفوذ طی استحاله فریت-آستنیت به جای مورفولوژی اسکلتی، شکل می‌گیرد [۱۶].

شکل ۴ (الف و ب) ریزساختار فلز جوش نمونه C را در دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به مقدار  $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$  (۵۴٪) برای فلز پرکننده ERNiCrMo4 در نمودار فازی

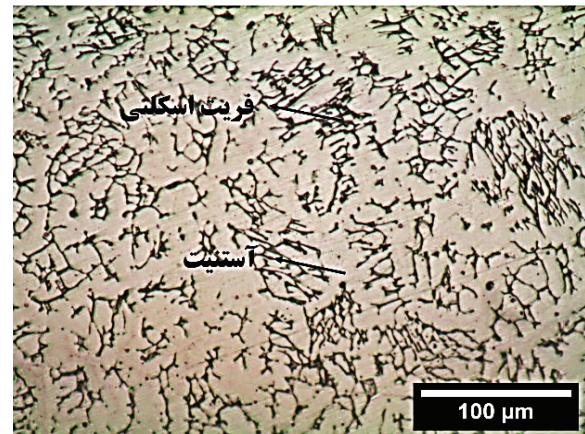
در جوش‌های چند پاسه فولادهای زنگ نزن با افزایش عدد فریت ساختار فلز جوش این فولادها تغییر می‌کند. با بررسی اثر پاس‌ها روی میزان فریت مشخص می‌شود که درصد فریت (در جوش‌های چند پاسه) در پاس‌های بالایی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت کروم به نیکل ساختار فلز جوش قابل تغییر است [۱۸].

شکل ۳ (الف و ب) ریزساختار فلز جوش نمونه B را در دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به مقدار  $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$  (۱/۸۵٪) برای فلز پرکننده آستنیتی ER309L در نمودار فازی Fe-Cr-Ni مشخص می‌شود که حالت انجماد در این فلز پرکننده FA بوده است. نمودار شیفلر نیز چنین ساختاری را پیش‌بینی کرده بود.

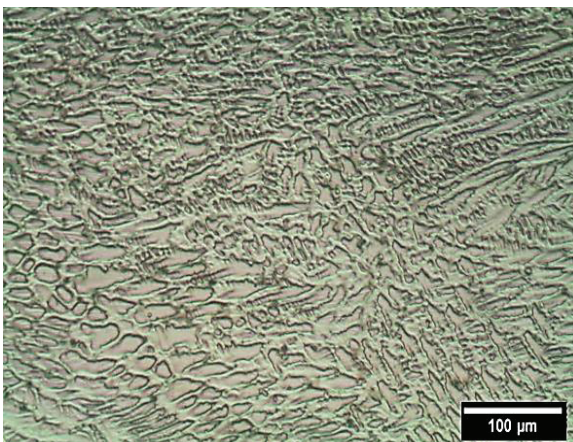
این تصاویر ساختارهای حاصل از یک انجماد FA را نشان می‌دهند. انجماد FA به صورت فریت اولیه رخ می‌دهد و در پایان انجماد مقداری آستنیت شکل می‌گیرد، به طوری که در انتهای انجماد فریت اولیه، یک واکنش پریتکتیک-یوتکتیک، آستنیت را در طول مرزهای سلولی و دندریتی فریت ایجاد



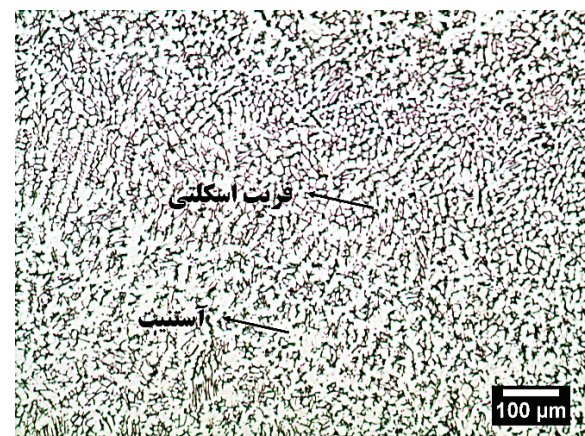
الف



الف



ب



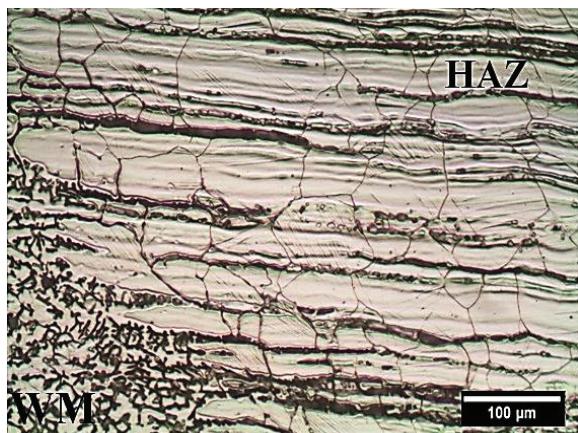
ب

شکل ۴. ریزساختار فلز جوش نمونه C در دو بزرگنمایی‌های متفاوت.

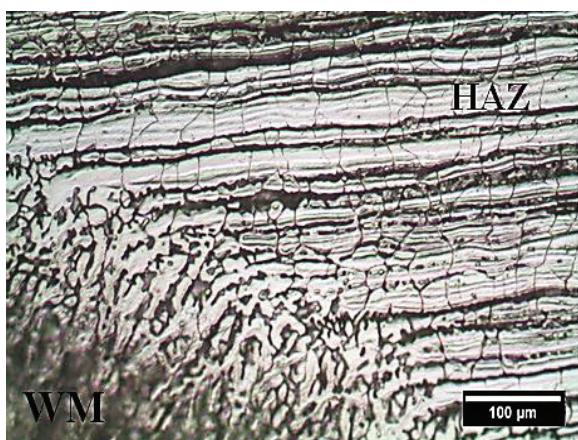
شکل ۳. ریزساختار فلز جوش نمونه B در دو بزرگنمایی متفاوت.



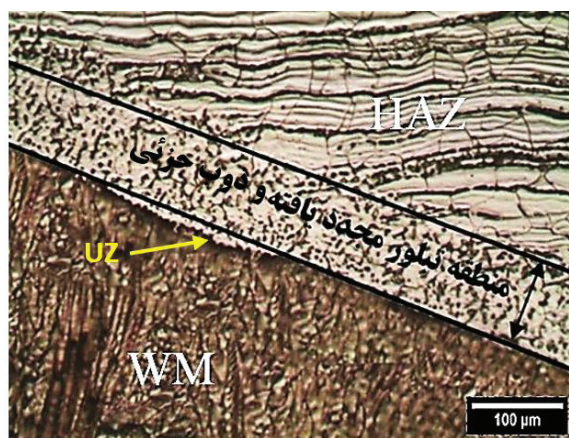
و تبلور مجدد ساختار نوردی فولاد AISI۳۱۶ می‌باشد [۱۹]. همچنین شکل ۶ آنالیز خطی عنصری از فلز پایه تا فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده در سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ (الف) و



الف



ب



ج

شکل ۵. ریزساختار مناطق متأثر از حرارت و فصل مشترک سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶. (الف) نمونه A، (ب) نمونه B و (ج) نمونه C.

Fe-Cr-Ni مشخص می‌شود که حالت انجمادی در این فلز پرکننده، انجماد نوع A بوده است.

این تصاویر ساختار حاصل از یک انجماد A را نشان می‌دهد. شیوه انجمادی A مربوط به انجمادی است که به صورت آستنیت اولیه رخ می‌دهد. همان‌گونه که از ریزساختار ارائه شده در شکل ۴ مشخص است، ساختار حاصل از فلز پرکننده ERNiCrMo4 یک ریزساختار کاملاً آستنیتی می‌باشد. این ریزساختار در نتیجه وجود مقدار بسیار بالای نیکل به‌عنوان یک عنصر آستنیت‌زا ایجاد شده است [۱۶].

همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است در مجاورت فلز پایه، ریزساختار به‌صورت ستونی و در مرکز فلز جوش ریزساختار به‌صورت هم‌محور می‌باشد. این امر به دلیل این است که با حرکت از فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه به سمت مرکز فلز جوش، شیب حرارتی (G) کاهش پیدا کرده و نرخ رشد (R) افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه نسبت شیب حرارتی به نرخ رشد ( $\frac{G}{R}$ ) کاهش پیدا می‌کند. با کاهش میزان  $\frac{G}{R}$  شیوه انجماد از مسطح به سلولی و از سلولی به دندردیتی هم‌محور تغییر می‌یابد [۱۹].

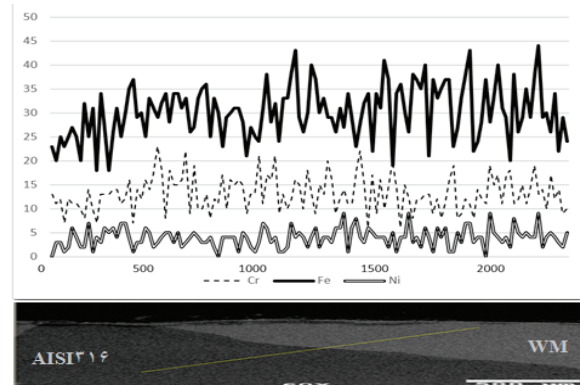
با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود در هر سه نمونه جوشکاری شده در سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ مناطق متأثر از حرارت تقریباً مشابهی به وجود آمده است. با پیشروی از سمت فلز پایه به سمت فلز جوش در منطقه متأثر از حرارت، دانه‌های آستنیت از حالت نوردی و کشیده به‌صورت هم‌محور در آمده است. دلیل این رخداد میزان حرارت ورودی بیشتر در نواحی نزدیک به فلز جوش می‌باشد که باعث تبلور مجدد<sup>۱۹</sup> و ایجاد دانه‌های هم‌محور آستنیت در این ناحیه شده است [۱۹ و ۲۰].

همچنین در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه نمونه‌های A و B به دلیل وجود حرارت زیاد و ماندگاری بیشتر این ناحیه در دماهای زیاد نسبت به نواحی دیگر HAZ، دانه‌های فریت اولیه فرصت رشد پیدا کرده و با افزایش رشد در نواحی فصل مشترک نمایان شده‌اند. همچنین رشد دانه‌ها در فصل مشترک فلزات پایه و فلزات جوش در نمونه‌های مذکور به‌صورت هم‌بافته می‌باشد که دلیل این رخداد شباهت ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش می‌باشد. اما در نمونه C با پیشروی از سمت فلز پایه به سمت فلز جوش، مقدار فریت در فصل مشترک و فلز جوش، به دلیل ساختار آستنیتی فلز جوش، کاهش پیدا کرده است. همچنین نمونه C فصل مشترک مشخص‌تری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد. این امر به علت تفاوت زیاد ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه AISI316 می‌باشد که باعث رشد انجمادی غیرهمبافته (غیر اپی تاکسی) می‌شود. همچنین در شکل ۵ (ج) در مجاورت فلز جوش در منطقه HAZ ناحیه‌ای ریزدانه قابل مشاهده می‌باشد که علت ریز شدن دانه‌ها در این منطقه حرارت ورودی زیاد

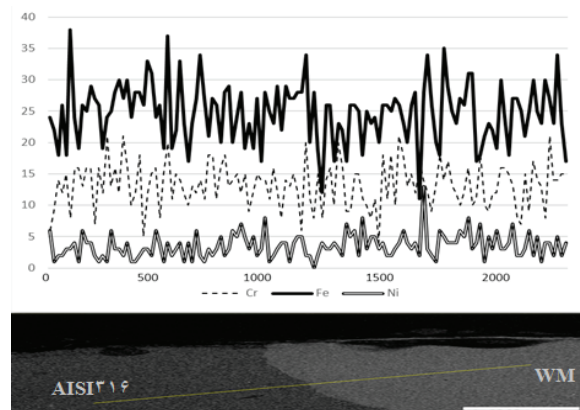
نمونه‌ها در سمت فلز پایه ۳۱۶ بالاست. با توجه به شکل ۶ (ج) (نمونه C)، تغییرات عناصر آهن، کروم، نیکل و مولیبدن از فلز پایه تا فلز جوش مورد بررسی قرار گرفت و همان‌طور که در این شکل مشخص است با حرکت از فلز پایه تا فلز جوش، نیکل و مولیبدن به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته‌اند و آهن نیز به‌طور قابل توجه کاهش یافته است. همچنین کروم در این نمونه نیز همانند سایر نمونه‌ها تغییرات چندانی نداشته است. این تغییرات شدید در عناصر Ni، Mo و Fe در این نمونه به ماهیت فلز جوش این نمونه برمی‌گردد. انتظار می‌رود این نمونه به علت تفاوت نسبتاً زیاد ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه ۳۱۶ نسبت به نمونه‌های قبلی فصل مشترک مشخص‌تری از خود نشان دهد و رشد می‌تواند به‌صورت غیرهمبافته باشد [۱۹]. وجود این فصل مشترک مشخص در شکل ۵ (ج) قابل مشاهده است. همچنین وجود منطقه سیاه‌رنگ در فصل مشترک بیانگر ایجاد یک منطقه مخلوط نشده است که کاملاً در تصاویر مذکور مشخص است. این منطقه در اثر تفاوت زیاد در ترکیب شیمیایی فلز پایه و جوش و عدم اختلاط کامل مذاب موجود در مرز ذوب با کل مذاب موجود ایجاد می‌شود.

شکل ۷ مناطق متأثر از حرارت فولاد زنگ نزن فرییتی ۴۳۰ را در سه نمونه جوشکاری شده نشان می‌دهد. منطقه متأثر از حرارت برای هر سه نمونه دارای ساختار فرییتی می‌باشد. پهنای منطقه متأثر از حرارت در فولاد زنگ نزن فرییتی ۴۳۰ بیشتر از پهنای این منطقه در فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ می‌باشد. این امر به دلیل هدایت حرارتی بالاتر فولادهای زنگ نزن فرییتی نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی می‌باشد. در فلزاتی که ضریب انتقال حرارت بالاتری دارند ایجاد تمرکز حرارت سخت است، بنابراین پهنای منطقه HAZ در این آلیاژها بیشتر است.

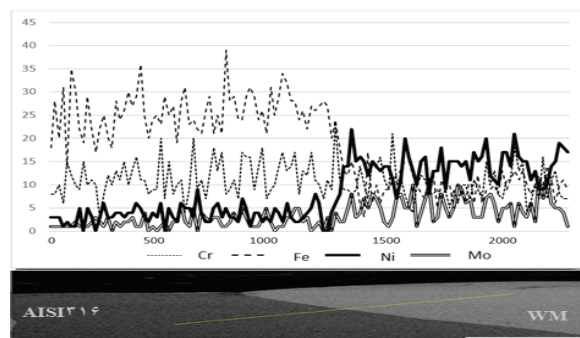
شکل ۸ فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه ۴۳۰ را در سه نمونه جوشکاری شده A، B و C نشان می‌دهد. از تصاویر شکل ۸ مشخص می‌شود که در فصل مشترک فولاد ۴۳۰ و فلز جوش تغییر ناگهانی ساختار برای هر سه نمونه جوشکاری شده اتفاق افتاده است. این تغییر ناگهانی و اختلاف در ساختار در مرز جوش در اتصال‌های غیرمشابه، به دلیل وجود اختلاف در ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و فلز پایه می‌باشد [۱۶]. هنگامی که جوشکاری با فلز پرکننده همراه باشد، ترکیب شیمیایی فلز جوش با ترکیب شیمیایی فلز پایه تفاوت داشته و ساختار کریستالی فلز جوش می‌تواند با ساختار کریستالی فلز پایه متفاوت باشد. هنگامی که این حالت رخ می‌دهد، رشد همبافته امکان‌پذیر نبوده و کریستال‌های جدیدی در مرز ذوب جوانه‌زنی می‌کنند [۲۱]. این تغییر ناگهانی ساختار در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه ۴۳۰، در نمونه C به علت اختلاف نسبتاً زیاد ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه، نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است و فصل مشترک



الف



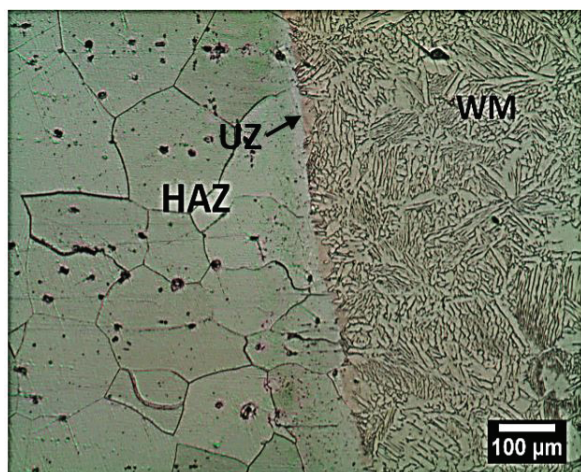
ب



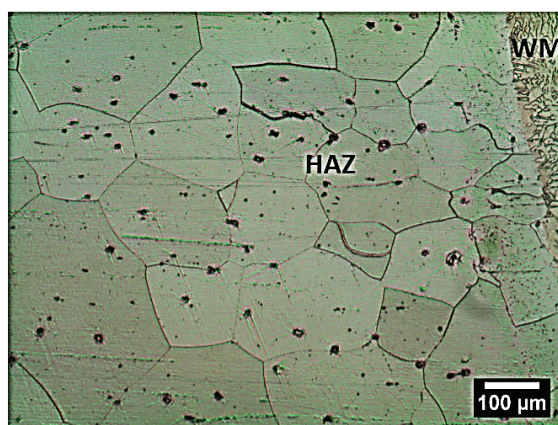
ج

شکل ۶. آنالیز خطی عنصری در فصل مشترک از فلز پایه تا فلز جوش سمت فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ (الف) نمونه A، (ب) نمونه B و (ج) نمونه C.

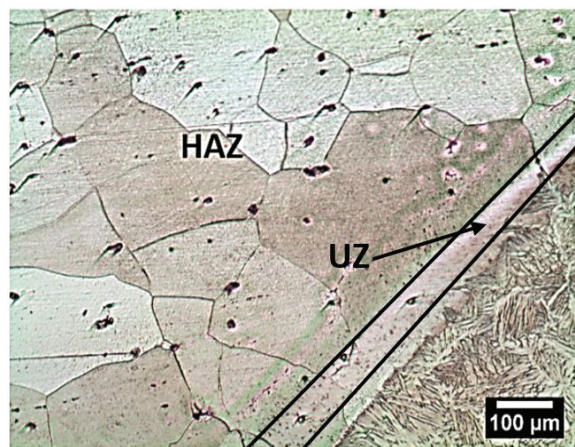
(ب) مشخص می‌شود با حرکت از فلز پایه AISI316 به سمت فلز جوش، در نمونه‌های A و B، عناصر آهن، کروم و نیکل تغییرات چندانی نداشته‌اند که این امر به دلیل شباهت ساختار و ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه در این نمونه می‌باشد. این امر نشان‌دهنده شکل‌گیری یک فصل مشترک یکنواخت و مناسب میان فلز پایه ۳۱۶ و فلز جوش می‌باشد که می‌تواند باعث کاهش تنش پسماند در این ناحیه شود. همچنین با توجه به مشابه بودن ترکیب شیمیایی دو طرف می‌توان گفت احتمال رشد همبافته (اپی تاکسی) در این



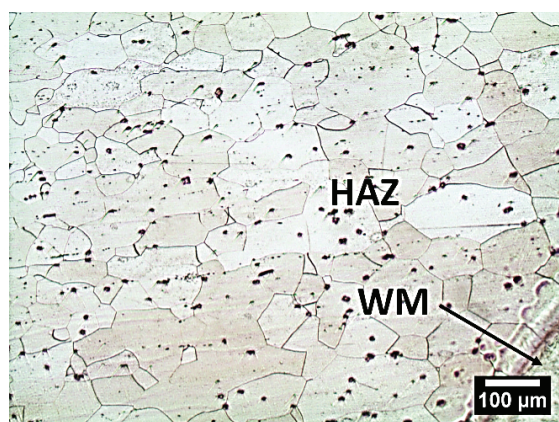
الف



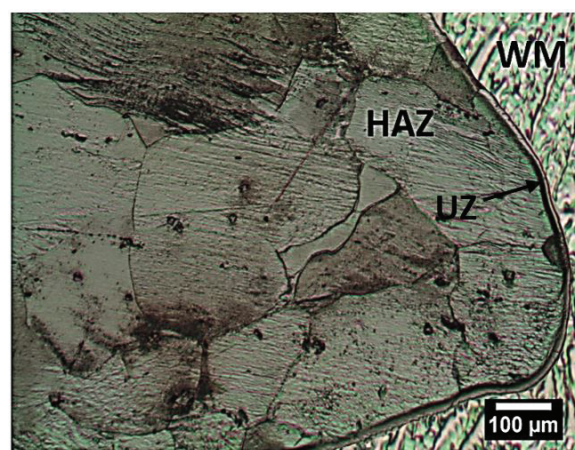
ب



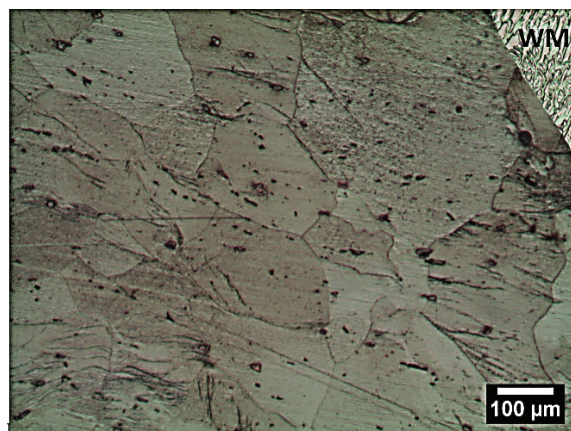
ج



د



ه



و

شکل ۷. ریزساختار مناطق متأثر از حرارت و فصل مشترک در فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰، (الف) نمونه A، (ب) نمونه B و (ج) نمونه C.

شکل ۸. ریزساختار فصل مشترک منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش سمت فولاد زنگ نزن ۴۳۰ (الف) نمونه A، (ب) نمونه B و (ج) نمونه C.

۸ (ج) قابل مشاهده است. این امر بیانگر یک انجماد کاملاً غیرهمبافته می‌باشد. در دو نمونه دیگر (A و B) نیز شواهدی از منطقه مخلوط نشده مشاهده شد که البته به دلیل تشابه بیشتر ساختار فلزات جوش این نمونه‌ها به فلز پایه ۴۳۰ در

مشخص‌تری ایجاد می‌کند. همچنین در فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه در نمونه C یک منطقه سیاه‌رنگ قابل مشاهده است که وجود این منطقه سیاه‌رنگ در فصل مشترک نشان‌دهنده یک منطقه مخلوط نشده در این ناحیه است. وجود فصل مشترک مشخص و منطقه مخلوط نشده در شکل

مولیبدن در فلز جوش در این نمونه با افزایش روبرو بوده است. همان‌طور که در شکل ۹ (ج) مشخص است با حرکت از فلز پایه به سمت فلز جوش، کروم تغییرات چندانی نداشته است، اما نیکل و آهن با شیب قابل توجهی روبرو بوده‌اند و میزان عنصر نیکل به‌طور قابل توجهی افزایش و عنصر آهن کاهش یافته است. این امر موجب پایداری فاز آستنیت در این نمونه (C) شده است که همان‌طور که قبلاً اشاره شد فلز جوش این نمونه دارای ساختار تماماً آستنیتی است. این تغییرات شدید در میزان عناصر Fe و Ni در این نمونه به ماهیت فلز جوش و تفاوت نسبتاً زیاد ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه ۴۳۰ برمی‌گردد. همچنین انتظار می‌رود در این نمونه به علت تغییرات شدید این عناصر و تفاوت نسبتاً زیاد ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه ۴۳۰ این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌ها فصل مشترک مشخص‌تری از خود نشان دهد و می‌تواند به‌صورت غیرهمبافته باشد [۱۹]. همان‌طور که قبلاً اشاره شد این فصل مشترک مشخص در شکل ۸ (ج) قابل مشاهده است.

### آزمون کشش

نتایج آزمون کشش نشان داد که تمامی نمونه‌های جوشکاری شده از فلز پایه AISI430 دچار شکست شدند. این بدان معنی است که ضعیف‌ترین قسمت در این قطعه جوشکاری شده، فلز پایه AISI430 می‌باشد. به‌طور کلی محل شکست در نمونه‌های جوشکاری شده به استحکام نسبی اجزای مختلف نمونه در اتصال بستگی خواهد داشت. نتایج آزمون کشش مربوط به اتصال غیرمشابه دو فلز پایه توسط فلزات پرکننده ER308L، ER309L و ERNiCrMo4 در جدول (۶) و خواص مکانیکی فلزات پایه در جدول (۷) آورده شده است. نتایج به دست آمده از آزمون کشش نشان می‌دهد که شکست در نمونه‌های جوش داده شده از فلز پایه AISI430 اتفاق افتاده است و

جدول ۶. نتایج آزمون کشش نمونه‌های مختلف.

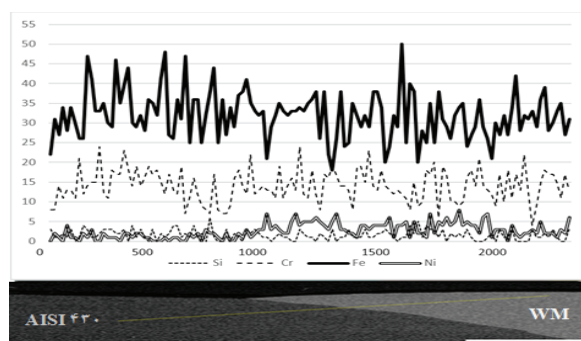
نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول (%)
A	۲۷۰/۲۴±۱۰	۴۹۵/۵۱±۱۵	۲۵/۶۴±۳
B	۲۲۹/۰۸±۹	۴۸۹/۶۹±۱۲	۲۰/۷۲±۲
C	۲۱۶/۱۰±۷	۴۹۳/۰۵±۱۰	۱۷/۳۹±۳

جدول ۷. خواص مکانیکی فلزات پایه.

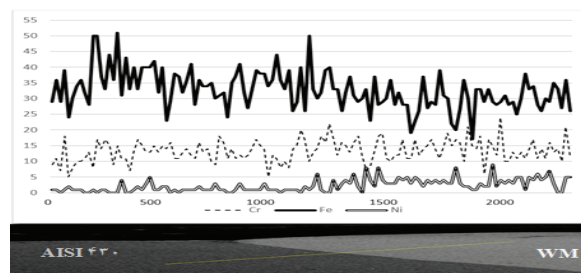
فلز پایه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول در ۲ اینچ (%)
AISI430	۲۶۰±۱۰	۴۹۰±۸	۲۲±۳
AISI316	۲۶۰±۸	۵۵۰±۱۲	۴۰±۵

مقایسه با فلز جوش نمونه C این منطقه در تصاویر شکل ۸ (الف و ب) چندان واضح نیست. منطقه مخلوط نشده معمولاً به علت عدم اختلاط لایه مرزی حوضچه مذاب با کل جریان مذاب حوضچه در اثر جریان ضعیف سیال داخل حوضچه ایجاد می‌گردد و موجب می‌شود خواص این لایه نسبت به بقیه فلز جوش متفاوت باشد [۲۰].

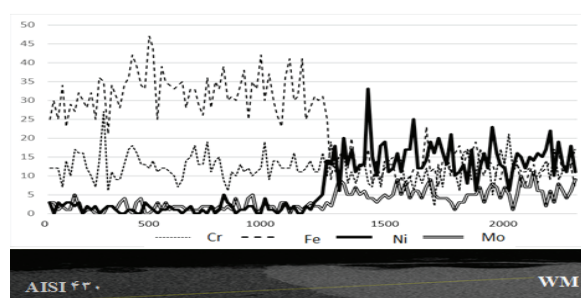
شکل ۹ آنالیز خطی عنصری از فلز پایه تا فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده در سمت فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ مشخص می‌شود در نمونه‌های A و B (الف و ب) با حرکت از فلز پایه به سمت فلز جوش عناصر آهن و کروم تغییرات چندانی نداشته‌اند، ولی میزان عنصر نیکل در هر دو نمونه با حرکت از فلز پایه به سمت فلز جوش افزایش داشت. در نمونه C میزان تغییرات آهن، کروم، نیکل و مولیبدن مورد بررسی قرار گرفت و همان‌طور که در شکل ۹ (ج) مشخص است، میزان عنصر



الف



ب



ج

شکل ۹. آنالیز خطی عنصری در فصل مشترک از فلز پایه تا فلز جوش سمت فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰، (الف) نمونه A، (ب) نمونه B و (ج) نمونه C.

جدول مذکور مشخص می‌شود که در نمونه A ۱۲/۰۸ درصد، در نمونه B ۱۴/۸ درصد و در نمونه C ۰/۵ درصد از فاز فریت وجود دارد. نتایج حاصل از فریت سنجی نمونه‌های جوشکاری شده نشان می‌دهد که میزان فاز فریت موجود در فلز جوش آستنیتی به مقداری بوده است که برای عدم ایجاد ترک انجمادی اطمینان حاصل شود، اما در نمونه C به مقدار بسیار کم تشکیل شده است که این امر موجب افزایش چقرمگی و استحکام در این نمونه می‌شود. از طرفی می‌تواند این نمونه را مستعد به ایجاد ترک گرم در حین انجماد کند.

مقدار زیاد فریت در فولاد (بیشتر از ۱۰٪ حجمی) تمایل به کاهش چقرمگی و مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد، در حالی که مقادیر خیلی کم فریت (کمتر از ۵٪ حجمی) می‌تواند سبب ترک خوردن انجمادی شود. فریت فلز جوش فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای سه نوع مورفولوژی مختلف است، که شامل فریت بین دندریتی، فریت کرمی شکل و فریت شبکه‌ای می‌باشد [۳]. زمانی که  $\frac{C_{req}}{Ni_{eq}}$  کم باشد و ماده در محدوده AF قرار داشته باشد، فریت بین دندریتی ایجاد می‌شود. زمانی که  $\frac{C_{req}}{Ni_{eq}}$  کم باشد و ماده هنوز در محدوده FA قرار داشته باشد، مورفولوژی فریت کرمی شکل یا اسکلتی ایجاد می‌شود. چنین مورفولوژی در ریزساختار فلز جوش ER309L (شکل ۳) قابل مشاهده است. با افزایش مقادیر  $\frac{C_{req}}{Ni_{eq}}$  در محدوده انجماد FA یک مورفولوژی فریت شبکه‌ای ایجاد می‌شود. چنین مورفولوژی در ریزساختار فلز جوش ER308L (شکل ۲) قابل مشاهده است. آزمون فریت سنجی برای فلزات پایه نیز انجام شده است و نتایج محاسبه مقدار فریت فلزات پایه در جدول ۸ گزارش شده است.

### آزمون ضربه

نتایج آزمون ضربه شاریپی برای فلزات جوش نمونه‌های A، B و C در شکل ۱۱ آمده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که نمونه‌های A و C بالاترین مقادیر انرژی ضربه را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن نمونه B نیز مقدار انرژی ضربه کمتر اما قابل قبولی از خود نشان داده است. این رخداد را این گونه می‌توان توجیه کرد که مقاومت به ضربه نمونه‌ها به‌طور مستقیم با مقادیر فریت موجود در ساختار آن‌ها در ارتباط است و علت مقدار پایین‌تر استحکام ضربه در نمونه B حضور

جدول ۸. درصد حجمی فاز فریت در فلزات جوش و پایه.

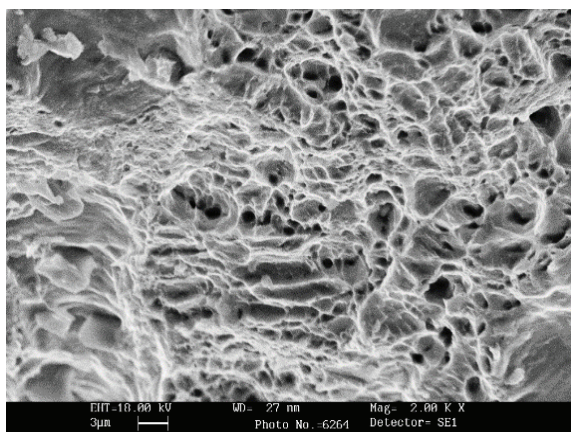
کد نمونه	درصد حجمی فاز فریت
WM-A	۱۲/۰۸
WM-B	۱۴/۸
WM-C	۰/۵
BM-430	۸۲/۶۸
BM-316	۲/۴۴

منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت دچار شکست نشد. این اتفاق را می‌توان با ساختار فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 و مقدار بالای فریت در این فولاد توجیه کرد [۶].

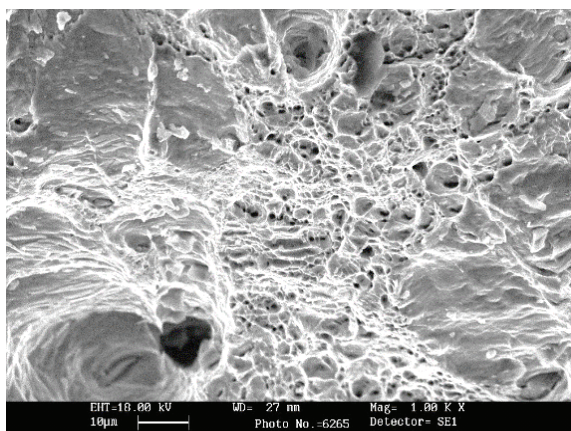
از آنجایی که در آزمون کشش، شکست در هر سه نمونه از فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ اتفاق افتاد، سطح شکست یکی از نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از شکل ۱۰ مشخص می‌شود که سطح شکست در نمونه کشش دارای فرورفتگی‌های متناوب و عمیق بدون وجود صفحات صاف در این مقاطع بوده است. عمق زیاد فرورفتگی‌ها در این مقاطع، با وجود مقدار بالای فاز فریت در فلز پایه قابل توجیه می‌باشد. این حالت نشان می‌دهد که شکست در فلز پایه از نوع نرم می‌باشد. این رخداد به دلیل اعمال نیروی کششی تدریجی بر روی نمونه‌ها می‌باشد [۲۲].

### فریت سنجی

نتایج محاسبه مقدار فریت در فلز جوش و فلزات پایه با استفاده از فریت اسکوپ در جدول (۸) نشان داده شده است. با توجه به



الف

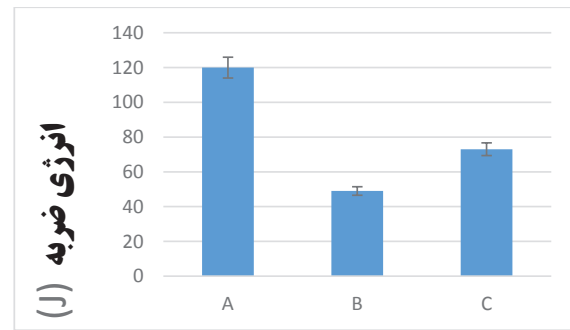


ب

شکل ۱۰. سطح شکست در آزمون کشش نمونه A در بزرگنمایی‌های متفاوت.

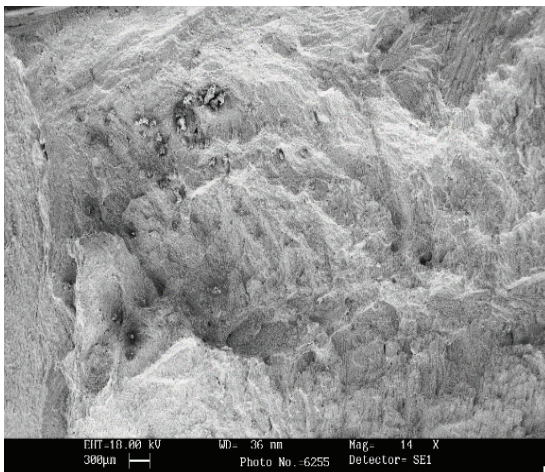
می‌شود. در این نمونه ساختار تماماً آستنیتی موجب افزایش انرژی ضربه شده است. همچنین مقدار بالای نیکل یکی دیگر از دلایل افزایش چقرمگی در این نمونه می‌باشد.

علت مقدار بالای انرژی ضربه در نمونه A نسبت به دیگر نمونه‌ها را نمی‌توان به درصد فاز فریت آن نسبت داد، چرا که میزان فریت در این نمونه تقریباً نزدیک به میزان فریت در نمونه B و بیشتر از میزان فریت در نمونه C می‌باشد. اما همان‌گونه که در شکل مشخص است انرژی ضربه آن بیشتر از دیگر نمونه‌ها است. علت مقدار بالای انرژی ضربه در نمونه A نسبت به بقیه نمونه‌ها ریزساختار آن می‌باشد. حضور مقادیر کم از فاز فریت، توزیع مناسب این فاز در زمینه آستنیتی فلز جوش، ساختار FCC فلز جوش، ریزدانه بودن و هم محور بودن ساختار درون‌دانه‌ها و همچنین وجود آستنیت سوزنی و ویدمن اشتاتن در ساختار این نمونه می‌تواند از عوامل بالا بودن انرژی ضربه و چقرمگی در نمونه A باشد که شکل ۲ نیز این موضوع را نشان می‌دهد [۲۳ و ۱۹].

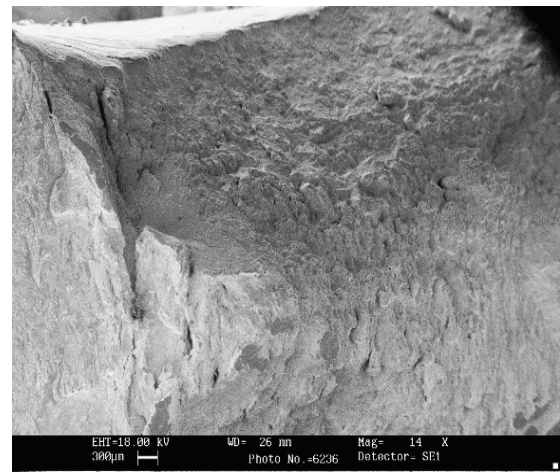


شکل ۱۱. نمودار متوسط انرژی ضربه در فلزات جوش مختلف.

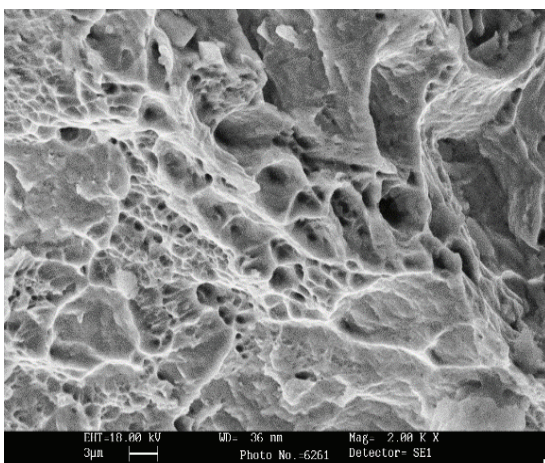
مقادیر زیادتر از فاز فریت در نمونه جوش B نسبت به نمونه C بوده است. به‌طور کلی، فاز فریت با مقادیر کروم زیاد چقرمگی و انعطاف‌پذیری کمی دارد. علت مقادیر بالای استحکام ضربه در نمونه C کم بودن فاز فریت در فلز جوش این نمونه می‌باشد (جدول ۸). عدم حضور فاز فریت باعث بهبود خواص ضربه



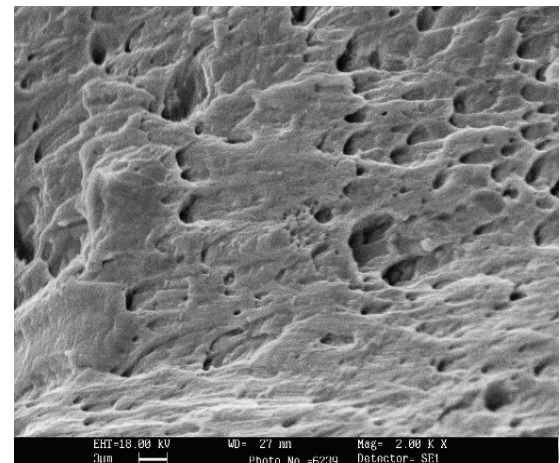
ج



الف



د



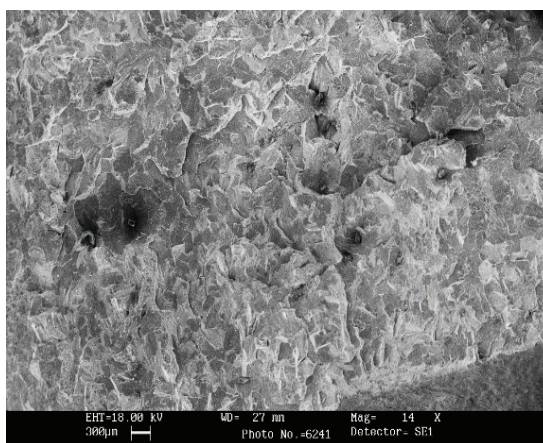
ب

شکل ۱۲. سطوح شکست اتصالات در آزمون ضربه برای نمونه‌های جوشکاری شده (الف و ب) نمونه A و (ج و د) نمونه C.

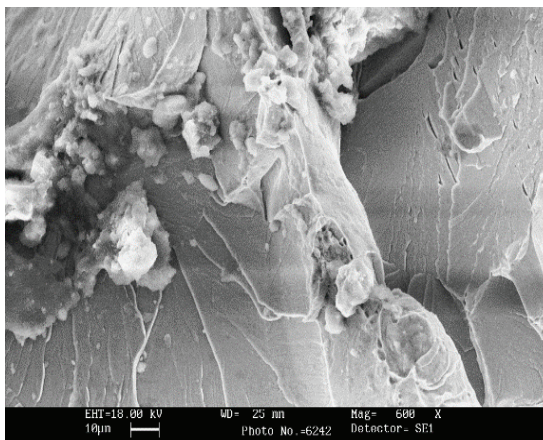
### بررسی سطوح شکست در آزمون ضربه

شکل ۱۲ سطح شکست فلز جوش نمونه A و C را در دو بزرگنمایی متفاوت ارائه می‌دهد. از شکل ۱۲ مشخص می‌شود که سطوح شکست در دو نمونه A و C دارای فرورفتگی‌های متناوب و منظم و بدون وجود صفحات صاف و تورقی در این مقاطع بوده است. این حالت نشان می‌دهد که شکست در این دو نمونه جوش از نوع نرم بوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای در آن‌ها وجود ندارند. با توجه به میزان انرژی جذب شده بالا در این دو نمونه (شکل ۱۱)، شکست نرم در آن‌ها قابل توجیه است. در نمونه A ساختار شکست کاملاً نرم دیده می‌شود که تغییر شکل پلاستیک شدیدی را ایجاد کرده است. تنها تفاوت موجود در اندازه فرورفتگی‌ها بوده است که نمونه A بیشتر از C بوده است. این امر با وجود مقادیر بیشتر فاز فریت در این نمونه قابل توجیه است و می‌توان فرورفتگی‌ها با اندازه بیشتر را به وجود مقادیر بیشتر فاز فریت در این ساختار نسبت داد [۲۲].

شکل ۱۳ سطح شکست فلز جوش نمونه B را در دو بزرگنمایی متفاوت ارائه می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳ (الف)



الف



ب

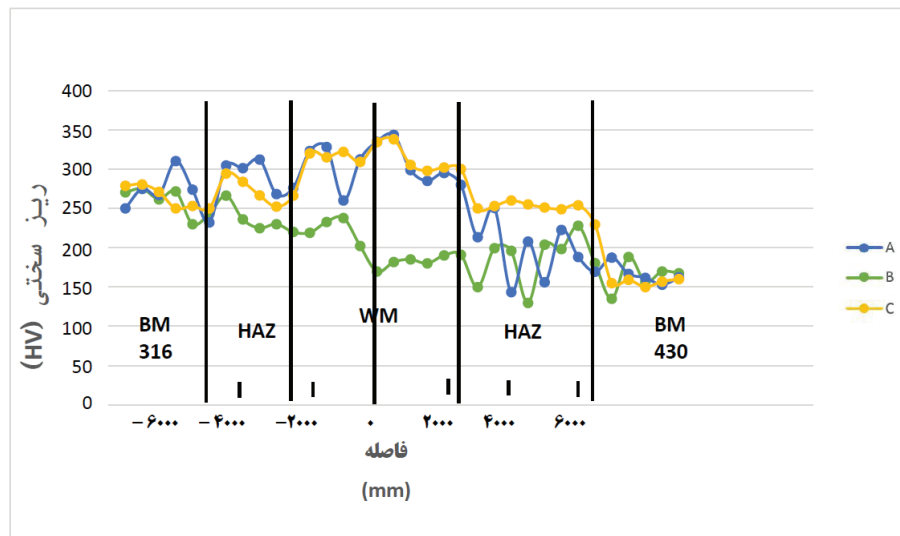
شکل ۱۳. سطح شکست فلز جوش در آزمون ضربه برای نمونه B در دو بزرگنمایی متفاوت.

به نظر می‌رسد که شکست در فلز جوش این نمونه عمدتاً از نوع ترد می‌باشد. این موضوع با توجه به میزان انرژی جذب شده پایین در این نمونه نسبت به نمونه A و C (شکل ۱۱) نیز قابل توجیه می‌باشد. با افزایش بزرگنمایی در شکل ۱۳ (ب) در نواحی دیگر از سطح شکست جوش این نمونه‌ها مشخص می‌شود که صفحات تورقی و فرورفتگی‌هایی به صورت جزئی در اطراف این صفحات صاف وجود دارند. شکست در این نمونه عمدتاً از نوع ترد می‌باشد ولی در برخی نواحی شکست نرم نیز به صورت جزئی قابل مشاهده می‌باشد ولی در نهایت می‌توان گفت شکست در این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر تردتر است.

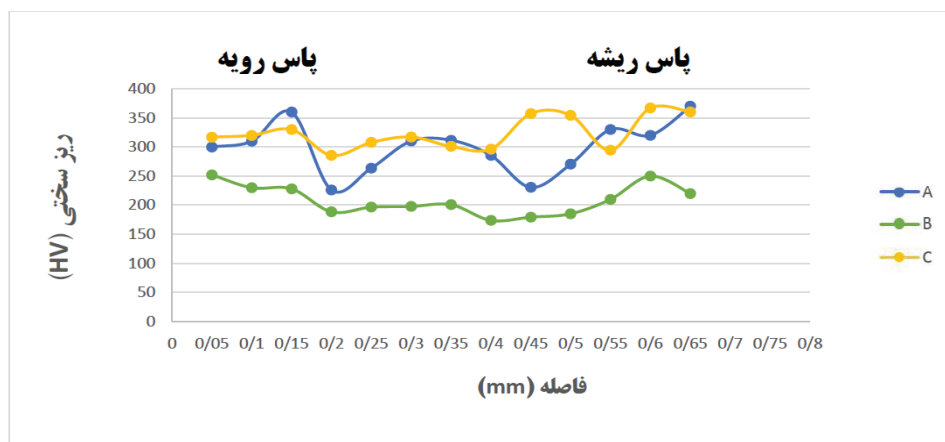
### ریزسختی سنجی

نتایج آزمون ریزسختی سنجی افقی از فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ تا فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی یک روند صعودی از سمت دو فلز پایه به سمت فلز جوش وجود دارد. با توجه به شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود که سختی در فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی کمتر از سختی فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ و در حدود ۱۷۰ ویکرز می‌باشد. در صورتی که میزان سختی در فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶، در حدود ۲۵۰ ویکرز می‌باشد. در منطقه متأثر از حرارت در هر دو سمت، هر سه نمونه افزایش سختی نسبت به فلز پایه داشتند. این افزایش سختی در منطقه HAZ، به دلیل تبلور مجدد و هم محور شدن دانه‌ها و حضور بیشتر فاز فریت در این ناحیه می‌باشد [۲۴]. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نمونه‌های A و C بیشترین مقدار سختی در فلز جوش را به خود اختصاص داده‌اند. همان‌طور که در شکل پیداست نمونه B دارای کمترین میزان سختی در فلز جوش می‌باشد. این امر به دلیل ساختار درشت‌دانه فلز جوش و پایین بودن عناصر آلیاژی خاص از جمله مولیبدن در فلز پرکننده ER309L نسبت به دیگر فلزات پرکننده در نمونه‌های جوشکاری شده می‌باشد. میزان عنصر مولیبدن در فلز جوش نمونه B، در حدود ۰/۳۸٪ می‌باشد در صورتی که میزان این عنصر در نمونه C بیشتر از ۵/۵٪ می‌باشد. این امر خود باعث افزایش سختی محلول جامد در فلز جوش نمونه C شده و در نتیجه مقادیر سختی در فلز جوش این نمونه از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. همچنین ساختار درون دانه‌ای هم محور بسیار ریز در دو نمونه A و C می‌تواند یکی دیگر از عوامل بالا بودن سختی فلز جوش این دو نمونه باشد [۲۵].

همچنین شکل ۱۵ نتایج ریزسختی سنجی عمودی از پاس رویه تا پاس پشتی در فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود پاس‌های ریشه و رویه، در هر سه نمونه دارای سختی نسبتاً بیشتری نسبت به پاس میانی می‌باشند.



شکل ۱۴. پروفیل سختی از فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی AISI430L تا فلز پایه فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316L.



شکل ۱۵. نمودار ریزسختی سنجی عمودی برای سه نمونه جوشکاری شده.

#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر فلزات جوش مختلف بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. ریزساختار در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER308L آستنیتی همراه با فریت شبکه‌ای، فریت کرمی شکل و آستنیت ویدمن اشتاتن، در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L آستنیتی همراه با فریت اسکلتی و در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCrMo4 کاملاً آستنیتی بود.
۲. نتایج آزمون کشش نشان داد که نمونه‌ها از قسمت فلز پایه فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 و به صورت نرم دچار شکست شدند.

این افزایش سختی در این پاس‌ها به دلیل سرمایه‌ش سریع این پاس‌ها و در نتیجه به تعویق افتادن استحال نفوذی فریت به آستنیت و رفتن تعادل فازی فریت-آستنیت به سمت فاز فریت و ایجاد ساختار ریزتر در این پاس‌ها می‌باشد. اما در پاس‌های میانی به دلیل اعمال حرارت مجدد توسط پاس‌های رویه و پشتی، ساختار جوش درشت‌تر شده و در نتیجه میزان سختی کمتر می‌شود [۲۵].

به طور کلی سختی در پاس‌های مختلف، در نمونه B، دارای کمترین مقدار و در نمونه C دارای بیشترین مقدار می‌باشد که این امر به دلیل ساختار درشت‌دانه فلز جوش و پایین بودن عنصر آلیاژی مولیبدن در نمونه B و بالا بودن میزان این عنصر در نمونه C و همچنین توزیع مناسب فاز فریت دلتا و ساختار درون دانه‌ای هم محور و ریز در این نمونه می‌باشد [۲۵].



## References

۳. سختی فلز جوش در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCrMo4 به دلیل وجود عناصر آلیاژی، ساختار ریزدانه و افزایش مرز دانه‌ها، بالاتر از نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L بود.
۴. در هر سه نمونه، در منطقه متأثر از حرارت به دلیل تبلور مجدد و هم محور شدن دانه‌ها و همچنین وجود بیشتر فاز فریت دلتا در این ناحیه افزایش سختی نسبت به فلز پایه مشاهده شد.
۵. انرژی جذب شده در آزمون ضربه برای فلز جوش نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER308L بیشترین مقدار و برای نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L کمترین مقدار را دارا بود که علت انرژی ضربه بالای نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER308L، ریزساختار آن بود. حضور مقادیر کم از فاز فریت، توزیع مناسب این فاز در زمینه آستنیتی و همچنین ریزدانه بودن و هم محور بودن ساختار درون دانه‌ها از عوامل بالا بودن انرژی ضربه در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER308L بود. همچنین حضور مقادیر بسیار کم از فاز فریت در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCrMo4 نسبت به دیگر نمونه‌ها علت انرژی ضربه بالا در این نمونه بود.
۶. شکست فلز جوش در دو نمونه جوشکاری شده با فلزات پرکننده ER308L و ERNiCrMo4 از نوع نرم بوده و در نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309L شکست تردتری اتفاق افتاد.
- در پایان فلز پرکننده آستنیتی ER308L به دلیل خواص مکانیکی مناسب از جمله انرژی ضربه بالا، استحکام تسلیم بالا و شکست نرم در آزمون ضربه و میزان سختی نسبتاً بالا و همچنین درصد فاز فریت مناسب در فلز جوش ایجاد شده، فلز پرکننده مناسب‌تری جهت اتصال فولاد زنگ نزن فریتی AISI430 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316 ارزیابی شد.
- [1] Leslie A, chromium steel and irons, ARCHIVE: proceedings of the Institution of Automobile Engineers 1906-1947, 183-217,1921. Doi: 10.1243PIAE-PROC-1921-016-019-02.
- [2] Francois C, Ferrous Metals and Their Alloys, in Materials Handbook, 2ndEd. Springer London, 2008. ISBN978-1-84628-668-1 doi: 10, 10071978-1-84628-669-8 PP.59-1570.
- [3] Heat Exchanger Design Handbook 2nd edition, Kuppam Thulukkanam, CRC press, 2013.
- [4] Jin. Z, Li. H, Jia. G, Gao.H, "Dynamic nonlinear modeling of 3D weld pool surface in GTAW", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.39, PP.1-8, 2016.
- [5] Floreen, S, and Hanyden, H.W. 1968. Transactions of the American society for Metals, 61:489-499.
- [6] Smith. W, structure and properties of Engineering Materials, McGraw-Hill, 1987.
- [7] Thielsch, H.1951. Physical and welding metallurgy of chromium stainless steels, welding journal, 30(5):209s-250s.
- [8] Demo, g.g.1977. structure and constitution of wrought ferritic stainless steels, in hand book of stainless steels, D. peckner and I.M. Bernsstein, eds, McGraw-Hill, New york.
- [9] Ally Digest Source Book: stainless steel, ASM International, 2000.
- [10] Albert. S.K, Das .C.R, Shiju. S, Mastanaiah. P, patel. M, Bgadari. A.K, Jayakumar. T, Murthy.C.V.S, Kumar. R, "Mechanical properties of similar and Dissimilar weldments of RAFMS and ASIS 316L(N) SS prepared by electron beam welding process", Fusion Engineering and Design, Vol.89, PP.1605-1610.2014.
- [11] Khan. M.M.A, Romoli. L, Dini. G, "Laser beam welding of Dissimilar ferritic/martensitic stainless steels in a butt joint configuration", optics and laser Technology, Vol.49, PP.12-136,2013.
- [12] Satyanarayana. v.v, Madhusudhan Reddy. G, Mohandas.T, "Dissimilar Metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steel", Journal of Materials processing Technology, Vol.160, PP.128-137,2005.
- [13] Mukherjee. M, Pal. T.K, "Influence of Heat Input on Martensite formation and Impact property of ferritic-Austenitic Dissimilar weld Metals", J.Mater.sci.Technol, Vol.28(4), PP.343-352,2012.
- [14] Chen.c.-L, Richter.A, Kogler.R, Griepentrog.M, Reinstadt.P, "Ion-irradiation effects on dissimilar friction stir welded joints between ODS alloy and ferritic stainless steel" Journal of Alloys and compounds, Vol615, PPS448-S453, 2014
- [15] Zhang. J, Bo. H, Qingsheng W, Li. Ch, Huang. Q, "Effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of CLAM/316L Dissimilar joint", Fusion Engineering and Design, Vol.100, PP.334-339,2015.
- [16] Lippold. J, C and kotccki, D. J, "welding metallurgy and weldability of austenitic steels", John Wiley & Sons Inc. New Jersey WSA, 2005.
- [۱۷] قافانی. م. بررسی متالورژیکی جوش‌پذیری فلزات غیرهمجنس در حالت ذوبی، سبزبان-آمده ۱۳۸۸
- [18] Brook. J. and Tompson A.W., "micro structural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds", International materials.

- [۱۹] شمعیان. م، رحیمی، متالورژی جوشکاری و جوش پذیری فولادهای زنگ نزن، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان- مرکز انتشارات، ۱۳۹۸.
- [20] Kou, S, "welding metallurgy", 2nd Ed., Wiley-Interscience. Newjersey, The United States of America, 2003.
- [21] 18th ed. O, brien R.L. , Ed. Jefferson Welding Encyclopedia, American Welding Society, Miami , FL, 1997, p. 316.
- [22] Bala Srinivasan .p, Muthupandi. V, Dietzel. W, Sivan. v, "An assessment of impact strength and corrosion behavior of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 3183 and IS2062 steels" Materials and design , Vol. 27 , pp. 182-191, 2006.
- [۲۳] شهیدی. ش، "متالورژی مکانیکی « تهران، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۶.
- [24] Mourad. A-H.I, Khorshid. A, Sharef. T , "Gas tungsten arc laser beam welding processes effects on duplex stainless steel 2205 properties", Materials science and engineering a, Vol. 549 , pp. 105-113 , 2012.
- [25] Wang. S, Ma.Q.Li.Y, "characterization of microstrusturee, mechanical properties and corsion resistance of dissimilar welded joint between 2205 duplex stainless steel and 16 MnR", materials and Design, vol.32, pp-831-837, 2011.